

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Зілінський Андрій Іванович

УДК 621.647.23

ДИСЕРТАЦІЯ

**Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких
середовищ**

Спеціальність 05.02.02 – Машинознавство

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Зілінський А.І.

Науковий керівник:

Луговський Олександр Федорович,

доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Зілінський А.І. Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких середовищ. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 «Машинознавство». - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.

Інтенсивний розвиток технологій із використанням рідин потребує постійного підвищення ефективності технологічного обладнання, яке забезпечує їх очищення від механічних та бактеріальних забруднень. На сьогоднішній день розроблено значну кількість способів та обладнання для очищення технологічних рідин, які відрізняються ефективністю та якістю очищення. Пристрої, які забезпечують фільтрування рідини, повинні відповідати певним вимогам, серед яких ступінь фільтрації від механічного та бактеріального забруднення; продуктивність; можливість відновлення фільтруючої здатності; стійкість фільтроелементу до фізичного або хімічного руйнування; термін або ресурс працездатності.

Найпоширенішим методом фільтрування є очищення рідин за допомогою пористої перегородки. Однак такий тип фільтрів не відповідає всім, наведеним вище, вимогам. При використанні пористих перегородок створюється значний перепад тиску, що призводить до зниження витрати. З часом у каналах пористої перегородки відбувається накопичення забруднювача, що призводить до вторинного забруднення рідини. Тому фільтри з пористою перегородкою потребують періодичної заміни. Проте, існують фільтри, що використовують для очищення ультразвукові коливання, інтенсивність яких перевищує поріг виникнення кавітації. Фільтрування в умовах ультразвукового поля дозволяє збільшити час безперебійної роботи фільтрувального обладнання за рахунок використання ефектів, що супроводжують явище ультразвукової кавітації.

Однак, відсутність методики розрахунку ультразвукових кавітаційних фільтрів та залежностей, які дозволять визначати їх раціональні експлуатаційні та конструктивні параметри та обирати матеріал, унеможлиблюють створення ефективних в експлуатації конструкцій на основі процесу ультразвукового впливу на рідину.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розроблення науково обґрунтованих технічних рішень кавітаційних фільтрів з ефектом самоочищення, які забезпечують необхідний ступінь фільтрування, високу продуктивність та регенерацію фільтрувальної перегородки, що дає можливість підвищити ефективність технологічних процесів з використанням рідини.

У роботі представлений аналіз відомих способів регенерації фільтрувальних перегородок та засоби їх реалізації в технологічних процесах машинобудування, хімічної промисловості, медицини та сільського господарства. На основі якої наведена уточнена фізична і математична моделі взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні, в яких враховано надзвукові швидкості руху частинок забруднювача.

Запропонована модель ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні, яка показує, що взаємодія відбувається при надзвукових швидкостях. Наведено порівняння взаємодії частинки іржі з фторопластом Ф4 та сталю 12Х18Н10Т. За результатами сталь 12Х18Н10Т вдвічі менше піддається впливу кавітаційної ерозії у порівнянні з фторопластом Ф4.

Методика розрахунку представлена в роботі дозволяє розрахувати резонансні елементи конструкції корпусу фільтра та приводів-випромінювачів, застосування якої передбачає врахування умов експлуатації, характеристик конструкційних матеріалів та марки п'єзоелектричних перетворювачів, що в сукупності забезпечує збільшення безперервної роботи фільтроелементу. На основі методики розроблені та впровадженні конструкції ультразвукових фільтрів для технологічних процесів згущення цикорію та очищення

соняшникової олії, які забезпечили досягнення в середньому 45% збільшення часу безперервної роботи фільтрувального обладнання на виробництві..

Представлено планування експерименту впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів, серед досліджених параметрів найбільше на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів впливає Модуль Юнга матеріалу, а найменше – тривалість кавітації. За результатами експерименту встановлено, що сталь 12X18H10T являється най-більш доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах.

За результатами експериментального дослідження встановлено залежність надлишкового та вакууметричного тиску в кавітаційній камері на інтенсивність ультразвукової кавітації та визначено, що максимальна інтенсивність кавітаційного впливу припадає на інтервал тиску 0,2...0,3 МПа. Експериментально визначено раціональні параметри розташування фільтрувальної перегородки відносно ультразвукової хвилі в кавітаційній камері.

Ключові слова: ультразвукова кавітація, ультразвукове кавітаційне фільтрування, очищення рідин, фільтрування, стояча хвиля, кавітаційний реактор, ультразвуковий випромінювач.

Список публікацій здобувача

1. The Impact of Static Pressure on the Intensity of Ultrasonic Cavitation in Aqueous Media / O. F. Luhovskyi, I. A. Gryshko, **A. I. Zilinskiy**, A. I. Patsola. // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2018. – №40. Issue3. С. 143–150. (Закордонне видання, що входить до Web of Science, США)

2. Луговський О. Ф., **Зілінський А. І.**, Шульга А. В., Гришко . І. А., Лавріненко А. Д., Галецький О. С., Завалій О. П. (2020) “Method for calculating a cylindrical ultrasonic cavitation filter chamber with a regeneration effect”, Visnyk NTUU KPI Serii a - Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia, (82), pp. 52-60. doi: 10.20535/RADAP.2020.82.52-60. (Входить до НМБ Web of Science)

3. Зілінський А.І. Можливості регенерації фільтруючих перегородок / О. Ф.Луговський, **А. І. Зілінський**, А. В. Шульга, І. А. Гришко. // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – №89. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar)

4. Луговська К. О. Особливості застосування ультразвукових коливань в технології фільтрування рідини / К. О. Луговська, **А. І. Зілінський**, О. О. Коваленко. // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2018. – №83. – С. 11–17. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar)

5. Зилинский А. И. Математическая модель процесса фильтрации в ультразвуковом поле повышенной интенсивности / **Зилинский А. И.**, Луговской А. Ф., Гришко И. А. // *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць*. – 2015. – № 2(74). – С. 11–17. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar)

6. Моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні / [**А. І. Зілінський**, О. Ф. Луговський, М. Г. Крищук та ін.]. // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – №88. – С. 58–65. (Входить в НМБ РІНЦ, Index Copernicus. Google Scholar)

Патенти:

7. Патент на винахід № 108589 МПК (2006,01) C02F1/36 C02F1/48 B01D33/03 B01D39/12 від 12.05.2015, Бюл. №3 / Ультразвукове кавітаційне обладнання / Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Гришко І.А., **Зілінський А.І.**, Луговський О.О.

8. Патент на корисну модель № 132117 МПК (2006.01) C02F1/36 від 11.02.2019, Бюл. №3 / Спосіб підготовки води в басейнах для плавання із застосуванням ультразвуку / Луговський О.Ф., Бернік І.М., **Зілінський А.І.**, Луговська К.О., Храменков О.В.

Тези доповідей:

9. Луговський О.Ф. Технологія ультразвукового кавітаційного фільтрування рідин Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези ХІХ Міжнародної

науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2014 р., м. Кіровоград.

10. Луговський О.Ф. Моделювання динаміки парогазової бульбашки в ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності/ Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2015р., м. Суми.

11. Луговський О.Ф. Моделювання процесу фільтрування рідини в ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності/ Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези IV Міжнародної науково-технічної конференції «Промислова гідравліка і пневматика», 2015., м. Суми.

12. Луговський О.Ф. Poprawa procesow technologicznych z wykorzystaniem zjawiska kawitacji / Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.**, Гришко І.А., Ночніченко І.В. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «NAPĘDY I STEROWANIA HYDRAULICZNE I PNEUMATYCZNE 2018», 2018 р., м. Kliczkowie.

13. Луговський О.Ф. Дослідження впливу ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали / Луговський О.Ф., Гришко І.А., **Зілінський А.І.** // Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2019 р., м. Київ. С.85-87.

14. Луговський О.Ф. Стенд для ультразвукового кавітаційного фільтрування рідин / Луговський О.Ф., **Зілінський А.І.** // Тези XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2014., м. Севастополь.

SUMMARY

Zilinskiy A.I. Ultrasonic cavitation filter with self-cleaning effect for liquid media. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The candidate's thesis nominated for a scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.02.02 – Machinery – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to solving problems at creation of ultrasonic cavitation filters with self-cleaning effect for liquid environments, contains theoretical and practical results of filtration process under conditions of ultrasonic cavitation.

Intensive development of technologies with the use of liquids requires constant improvement of the efficiency of technological equipment, which ensures their purification from mechanical and bacterial contamination. To date, a significant number of methods and equipment for cleaning process fluids have been developed, which differ in efficiency and quality of cleaning. Devices that provide liquid filtration must meet certain requirements, including the degree of filtration from mechanical and bacterial contamination; productivity; possibility of restoration of filtering ability; resistance of the filter element to physical or chemical destruction; term or resource of working capacity.

The most common method of filtration is the purification of liquids using a porous partition. However, this type of filter does not meet all of the above requirements. When using porous partitions, a significant pressure drop is created, which leads to a reduction in flow. Over time, contaminants accumulate in the channels of the porous septum, which leads to secondary contamination of the liquid. Therefore, filters with a porous partition need periodic replacement. However, there are filters that use ultrasonic vibrations for cleaning, the intensity of which exceeds the threshold of cavitation. Filtration in the conditions of an ultrasonic field allows to increase time of uninterrupted work of the filtering equipment due to use of the effects accompanying the phenomenon of ultrasonic cavitation.

However, the lack of methods for calculating ultrasonic cavitation filters and dependencies that will determine their rational operational and design parameters and choose the material, make it impossible to create efficient structures based on the process of ultrasonic exposure to the liquid.

The paper presents an analysis of known methods of regeneration of filter element and means of their implementation in the technological processes of mechanical engineering, chemical industry, medicine and agriculture. On the basis of which the specified physical and mathematical models of interaction of particles of pollutant with a filter element at ultrasonic cavitation filtration in which supersonic speeds of movement of particles of pollutants are considered are resulted.

According to the results of a computer study of the growth of a vapor gas bubble in an ultrasonic medium, the velocity of a contaminant particle near the wall of a collapsing cavitation bubble is obtained.

It is determined by mathematical modeling of the impact interaction of dirt particles with the filter partition, the dependence of wear of structural materials over time under the influence of ultrasonic cavitation of surfaces made of fluoroplastic F4 and steel 12X18H10T. It was found that 12X18H10T steel is twice less exposed to cavitation erosion compared to fluoroplastic F4, and, according to the results of an experimental study of the influence of ultrasonic cavitation process parameters on the relative volume loss of structural materials, it was found that the Young's modulus is significantly larger. the effect on the relative loss of volume of structural materials than the duration of the cavitation effect, ie 12X18H10T is a suitable material for use in ultrasonic cavitation filters.

An engineering method for calculating the resonant elements of the filter housing structure and radiator drives is proposed, the application of which takes into account the operating conditions, characteristics of structural materials and the brand of piezoelectric transducers, which together increases the continuous operation of the filter element. Based on the methodology, the design of ultrasonic filters for technological processes of chicory thickening and sunflower oil purification was

developed and implemented, which ensured the achievement of an average of 45% increase in the continuous operation time of filter equipment in production.

According to the results of the experimental study, the dependence of excess and vacuum pressure in the cavitation chamber on the intensity of ultrasonic cavitation was determined and it was determined that the maximum intensity of cavitation exposure falls on the pressure range 0.2...0.3 MPa. Rational parameters of the location of the filter partition relative to the ultrasonic wave in the cavitation chamber are experimentally determined.

Keywords: ultrasonic cavitation, ultrasonic cavitation filtration, liquid purification, filtration, standing wave, cavitation reactor, ultrasonic emitter.

Articles in professional journals:

1. The Impact of Static Pressure on the Intensity of Ultrasonic Cavitation in Aqueous Media / O. F. Luhovskyi, I. A. Gryshko, A. I. Zilinskiy, A. I. Patsola. // Journal of Water Chemistry and Technology. – 2018. – №40. Issue3. C. 143–150. (Foreign publication included in the Web of Science, USA)

2. O. F. Luhovskyi, A. I. Zilinskiy, A. V. Shulha, I. A. Gryshko, A. D. Lavrinenkov, O. S. Haletskyi, O. P. Zavalii (2020) “Method for calculating a cylindrical ultrasonic cavitation filter chamber with a regeneration effect”, Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, (82), pp. 52-60. doi: 10.20535/RADAP.2020.82.52-60. (Included NMB Web of Science)

3. Zilinskiy A.I. Possibilities of regeneration of filter partitions / A. Luhovskyi, A. Zilinskiy, A. Shulha, I. Gryshko // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – №89. (Included in NMB RINC, Index Copernicus. Google Scholar)

4. Lugovska K.O. Application of ultrasonic vibrations in filtering of liquid / A. Zilinskiy, K. Lugovska, O. Kovalenko. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2018. – №83. – C. 11–17. (Included in NMB RINC, Index Copernicus. Google Scholar)

5. Zilinskiy A. Mathematical model of the filtration process in an ultrasonic field of high intensity / A. Zilinskiy, A. Luhovskyi, I. Gryshko // Journal of Mechanical

Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute". – 2015. – № 2(74). – С. 11–17.
(Included in NMB RINC, Index Copernicus. Google Scholar)

6. Zilinskyi A. Modeling the shock interaction of a mud particle with a filter element at ultrasonic cavitation filtering / A. Zilinskyi, A. Luhovskyi, M. Kryshchuk, I. Gryshko, A. Shulha // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – №88. – С. 58–65. (Included in NMB RINC, Index Copernicus. Google Scholar)

Patents:

7. Invention patent № 108589 IPC (2006,01) C02F1/36 C02F1/48 B01D33/03 B01D39/12 from 12.05.2015, Bull. №3 / Ultrasonic cavitation equipment / O. Luhovskyi, A. Movchanyuk, I. Grishko, A. Zilinskyi, A. Luhovskyi

8. Utility model patent № 132117 IPC (2006.01) C02F1/36 from 11.02.2019, Bull. №3 / Method of preparing water in swimming pools with the use of ultrasound / . O. Luhovskyi, I. Bernyk, A. Zilinskyi, K. Luhovska, Khramenkov O.B.

Thesis:

9. Luhovskyi O. Technology of ultrasonic cavitation filtration of liquids / O. Luhovskyi, A. Zilinskyi // *Materials of XIX International scientific and technical conference “Hydroaeromechanics in engineering practice”*, 2014, Kirovograd.

10. Luhovskyi O. Modeling of steam-gas bubble dynamics in high-intensity ultrasonic field / O. Luhovskyi, A. Zilinskyi // *Materials of XVI International scientific and technical conference «Progressive technics, technology and engineering education»*, 2015, Sumy.

11. Luhovskyi O. Simulation of the process of liquid filtration in an ultrasonic field of high intensity / O. Luhovskyi, A. Zilinskyi// *Materials of IV International scientific and technical conference «Industrial hydraulics and pneumatics»*, 2015, Sumy.

12. Luhovskyi O. Poprawa procesow technologicznych z wykorzystaniem zjawiska kawitacji / O. Luhovskyi, A. Zilinskyi, I. Grishko, Nochnichenko I. // *Materials of international scientific and technical conference «NAPĘDY I STEROWANIA HYDRAULICZNE I PNEUMATYCZNE 2018»*, 2018, m. Kliczkowie.

13. Luhovskyi O. The influence of ultrasonic cavitation on construction materials / O. Luhovskyi, I. Grishko, A. Zilinskyi// Materials of XXIV International scientific and technical conference “Hydroaeromechanics in engineering practice”, 2019, Kyiv. C.85-87.

14. Luhovskyi O. Stand for ultrasonic cavitation filtration of liquids / O. Luhovskyi, A. Zilinskyi// Materials of XIV International scientific and technical conference «Progressive technics, technology and engineering education», 2014., Sevastopol.

Зміст

Перелік умовних позначень	14
Вступ.....	19
Розділ 1. Сучасний стан проблеми фільтрування рідин	25
1.1. Способи очищення рідин від механічних забруднень.....	25
1.1.1. Гравітаційне осадження	27
1.1.2. Очищення під дією відцентрових сил	28
1.1.3. Фільтрування як спосіб очищення рідин	29
1.2. Фільтрувальні перегородки	30
1.3. Модель руху рідини через пористу перегородку	33
1.4. Можливості регенерації фільтруючих перегородок	35
1.4.1. Механічна регенерація	37
1.4.2. Протиточна регенерація фільтрувальної перегородки	38
1.4.3. Імпульсна протиточна регенерація	41
1.4.4. Струменева регенерація	42
1.4.5. Хімічна регенерація.....	43
1.4.6. Вібраційна регенерація	46
1.4.7. Електрогідравлічна регенерація.....	48
1.4.8. Ультразвукова кавітаційна регенерація	49
1.4.9. Висновки.....	52
1.5. Застосування ультразвукових коливань в технології фільтрування рідини	52
1.6. Постановка задачі	59
Розділ 2. Моделювання процесу фільтрування рідини в ультразвуковому кавітаційному середовищі	61

2.1. Математична модель процесу руху частинки забруднювача в умовах ультразвукової кавітації	61
2.2. Моделювання ударної взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні.....	69
Розділ 3. Розробка технічного рішення та методики розрахунку ультразвукових кавітаційних фільтрів	82
3.1 Розробка технічного рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення	82
3.2 Методика розрахунку циліндричної ультразвукової кавітаційної камери фільтра з ефектом самоочищення	86
Розділ 4. Експериментальне дослідження роботи ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення.....	100
4.1. Дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів на основі планування багатофакторного експерименту	100
4.1.1 Обґрунтування методики моделювання.....	104
4.1.2 Математична модель ультразвукового кавітаційного процесу ..	108
4.1.3. Побудова регресивної моделі за методом Бокса-Вілсона	114
4.2 Дослідження впливу статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації	122
4.2 Дослідження впливу розташування фільтрувальної перегородки на стоячу хвилю.....	128
Загальні висновки.....	135
Список використаних джерел.....	135
Додатки	149

Перелік умовних позначень

A , B , D , G та Q - константи, що залежать від граничних умов;

\overline{A} - ротор векторного потенціалу;

a - прискорення руху частинки забруднювача;

B - матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{13}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії;

C - швидкість звуку;

$c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φi^{-1} ;

c_p - швидкість звуку в незбуреній рідині;

c_T - швидкість звуку в матеріалі циліндричної камери;

d - діаметр частинки;

$d_{ек}$ - еквівалентний діаметр каналу в шарі матеріалу;

d_k - діаметр концентратора поршневих коливань;

d_v - діаметр випромінювача;

dp – кількість значимих коефіцієнтів регресії;

E - модуль пружності (Модуль Юнга);

e – натуральний логарифм;

$E_{в1}, E_{в2}$ - хвильова енергія частинки забруднювача і поверхнею фільтроелементу, яка визначається об'ємами, що охоплені ударною хвилею;

E_k - кінетична енергія частинки забруднювача;

$E_{п}$ – втрата енергії на пластичну деформацію;

$E_{тр}$ - втрати енергії на тертя;

E_u - критерій Ейлера;

$E_{упр}$ - енергія пружної деформації частинки забруднювача та фільтроелементу;

E_{y1}, E_{y2} - енергія пружних деформацій частинки забруднювача та нерухомої поверхні;

F - площа поверхні;

f - частота звукових коливань;

f_1 - кількість ступенів вільності дисперсії адекватності;
 f_2 - кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності;
 $F_{\text{ср}}$ - середнє зусилля, яке діє в інтервалі часу Δt ;
 F_n – сила прикладена по нормалі;
 Fp – відносна площа ерозійного руйнування;
 $f_{\text{рез}}$ - резонансна частота;
 F_T - сила тертя;
 $F_{\text{уср}}$ - середнє зусилля пружних деформацій в інтервалі часу Δt ;
 g – кількість факторів;
 h_k - товщина стінки камери;
 h_y - пружна деформація;
 Δh_y - приріст пружної деформації за час Δt ;
 I_j – інтервал варіювання;
 $J_n(ar)$ -функція Бесселя порядку n ;
 K - коефіцієнт трансформації;
 k – інтенсивність кавітації;
 k_b - коефіцієнт збільшення пружної деформації за рахунок енергії хвилі;
 $K_{\text{опору}}$ - коефіцієнт лобового опору;
 K_d – коефіцієнт динамічності при ударному навантаженні;
 K_λ - коефіцієнт;
 i - число хвиль, розміщених по окружності кільця.
 l - характерний лінійний розмір;
 l_x - відстань між ультразвуковими приводами-випромінювачами на зовнішній поверхні циліндричної кавітаційної камери вздовж осі X ;
 m - маса частинки забруднювача;
 m_d – маса деформованого тіла;
 $m_{\text{ч}}$ - маса сферичної частинки;

N – кількість дослідів за матрицею планування;
 n - ціле число;
 N_0 – кількість дослідів в центрі плану;
 $n_{відк}$ – число вимірювань, що відкидається;
 $N_n(\alpha r)$ - функція Неймана порядку n ;
 p_0 - гідростатичний тиск;
 p_a - звуковий тиск, що створюється звуковим полем;
 p_n – тиск насиченого пару;
 R – коефіцієнт кореляції;
 r – радіус;
 R_0 - початковий радіус бульбашки;
 Re - критерій Рейнольдса;
 $R_{кр}$ - мінімальний розмір зародків, що можуть викликати кавітацію;
 $R_{рез}$ - резонансний розмір зародка;
 R_ϕ - опір фільтруючої перегородки;
 r_ϕ - питомий опір фільтрувальної перегородки;
 $r_\text{ч}$ - радіус сферичної частинки;
 S – площа поперечного перерізу;
 $S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності;
 $S_{відт}^2$ – дисперсія відтворюваності;
 S_M – площа вихідного торця (торця меншої площі);
 S_δ – площа вхідного торця;
 t, τ - час;
 U - швидкість руху стінки кавітаційної бульбашки;
 U_{max} - максимальна швидкість руху кавітаційної бульбашки;
 U_{min} - мінімальна швидкість руху кавітаційної бульбашки;
 U_k - критичне значення швидкості руху кавітаційної бульбашки;

\bar{U} - вектор деформації;
 u - коефіцієнт Пуассона;
 u_1, u_2 - швидкості мас $m_{\text{ч}}$ і $m_{\text{д}}$ після удару;
 \bar{U}_l - потенціальна складова вектору деформації;
 \bar{U}_τ - соленоїдальна складова вектору деформації;
 V - об'єм фільтрату;
 v – швидкість руху;
 dV – відносна втрата об'єму заготовки;
 V_0 – початкова швидкість сферичної частинки;
 v_F - швидкість рідини, віднесена до загальної поверхні фільтроелементу;
 $v_{\text{ув}}$ – швидкість поширення ударної хвилі;
 W – потужність;
 x - напрямок розповсюдження хвиль;
 \tilde{X}_{j0} – основний рівень фактора;
 $X_{j\max}, X_{j\min}$ – верхній та нижній рівні фактора;
 $\alpha X_{j\max}, \alpha X_{j\min}$ – максимальний та мінімальний рівні фактора;
 x_k - просторова координата;
 Y - матриця, що містить результати експериментів за матрицею планування;
 y – цільова функція;
 y_i – результат i -го дослідів, проведеною за матрицею планування;
 \tilde{y}_i – результат i -го значення дослідів, передбаченого за допомогою регресійної моделі;
 z – зіркове плече;
 α - деяка стала величина;
 β – довірна ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах;
 γ - показник політропи;

γ_a - показник адіабати;

γ_T - деяка стала величина;

δ - обсяг зони напружено-деформованого стану;

ε - частка пустот в шарі матеріалу, або коефіцієнт вільного об'єму;

η - коефіцієнт передачі кінетичної енергії;

θ - полярний кут;

λ – довжина хвилі;

λ_p – довжина хвилі в рідині;

λ_v – довжина хвилі в матеріалі випромінювача;

λ_l - перший коефіцієнт Ламме;

μ - в'язкість рідини;

μ_l - другий коефіцієнти Ламме;

ξ - поздовжнє переміщення;

ρ - щільність незбуреної рідини;

ρ_k - щільність матеріалу резонансної камери;

ρ_T - щільність матеріалу фільтроелементу;

σ - коефіцієнт поверхневого натягу;

σ_c - границя міцності матеріала;

σ_{rr} - тензор механічного напруження;

Φ - скалярне поле;

Φ_i - інформаційна матриця Фішера;

ω - колова швидкість коливань;

$[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера;

$[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Стюдента, яке дорівнює значенню розподілу Стюдента.

Вступ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток технологій потребує постійного покращення якості очищення технологічних рідин. На сьогоднішній день розроблено значну кількість способів очищення рідин, які відрізняються за швидкістю та якістю очищення. Пристрої, які забезпечують фільтрування рідини, повинні відповідати наступним основним вимогам:

- висока ступінь фільтрації;
- значна продуктивність;
- можливість відновлення фільтруючої здатності після демонтажу, або під час роботи;
- висока стійкість фільтроелементу до фізичного, або хімічного руйнування;
- значний час роботи без заміни.

Найпоширенішим методом фільтрування є очищення рідин за допомогою пористої перегородки. Однак такий тип фільтрів не відповідає всім наведеним вище вимогам. При використанні пористих перегородок створюється значний перепад тиску, що призводить до зниження витрати. З часом у каналах пористої перегородки відбувається накопичення забруднювача, що призводить до вторинного забруднення рідини. Тому фільтри з пористою перегородкою потребують періодичної заміни. Проте, існують фільтри, що використовують для очищення ультразвукові коливання високої інтенсивності. Фільтрування в умовах ультразвукового поля дозволяє збільшити час безперебійної роботи фільтрувальної установки за рахунок зменшення гідравлічного опору та за рахунок руйнування осаду вібрацією.

Однак на сьогоднішній день відсутній чіткий розрахунок ультразвукових кавітаційних фільтрів. Для їх створення потрібно вирішити наступні питання:

- визначити раціональні конструктивні розміри кавітаційного реактору;

- визначити режими роботи ультразвукового кавітаційного фільтру для забезпечення високої ефективності фільтрування рідин;
- оскільки кавітаційному руйнуванню та кавітаційній ерозії піддаються не тільки частинки забруднювача, а і елементи конструкції фільтра та сама фільтруюча перегородка, необхідно підібрати кавітаційно стійкий матеріал для створення елементів фільтру;
- розробити рекомендації стосовно раціонального розташування фільтроелементу в кавітаційній камері в разі збудження радіально-згинальних або радіальних резонансних коливань стінок кавітаційного реактору.

Також необхідно зазначити, що розроблення науково обґрунтованих рекомендацій дозволить створити ультразвуковий кавітаційний фільтр з необхідним ступенем фільтрування та частотою резонанса кавітаційної камери для виконання відповідного технологічного процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Окремі розділи дисертації є результатом виконання науково-дослідних робіт(НДР), проведених у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки, у тому числі № 0117U007179 «Система для ультразвукового кавітаційного очищення води» (№2047-р), № 0117U004337 «Створення високоефективних виконавчих пристроїв до адаптивних систем автоматизації з відкритою архітектурою» (№2038-п), № 2822 «Розробка гідравлічних мехатронних систем машинобудування з високим показником ефективності і надійності».

Мета роботи: Підвищення часу роботи фільтрувальної установки без заміни фільтроелементу шляхом створення кавітаційного середовища на поверхні фільтрувального елементу.

Об'єкт дослідження: Процеси, що відбуваються під час фільтрування в умовах ультразвукового кавітаційного середовища.

Предмет дослідження: Параметри, режими та конструкції ультразвукового кавітаційного обладнання, яке призначене для фільтрування рідини.

Методи досліджень: комплексний метод, що полягає в використанні математичного, фізичного та комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються в ультразвуковій кавітаційній камері та їх вплив на процес фільтрування з наступним експериментальним підтвердженням адекватності. Експериментальні дослідження виконувалися в лабораторних і виробничих умовах із застосуванням розробленого ультразвукового устаткування, оптичних і електронних вимірювальних пристроїв. Використовувались основні положення теорії похибок та планування експерименту. Для обробки даних використовувались методи обробки експериментальних даних та математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

В дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

- уточнена та доповнена фізична модель процесу фільтрування рідини в кавітаційному середовищі, яке утворене ультразвуковою хвилею пружної деформації. В моделі враховані ударні сферичні хвилі, кумулятивні мікрострумені, мікротечії тощо, притаманні явищу ультразвукової кавітації за наявності в рідині механічних забруднень;
- встановлені закономірності взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелементу, що знаходиться в кавітаційному середовищі, для різних конструкційних матеріалів;
- отримані експериментальні залежності стійкості різних конструкційних матеріалів в умовах ультразвукового кавітаційного впливу.

Практичне значення отриманих результатів. За результатом виконання дисертаційної роботи отримано:

- розроблено, виготовлено та впроваджено конструкції фільтрів з ефектом самоочищення в ультразвуковому кавітаційному середовищі;
- отримано патент України на винахід «Ультразвукове кавітаційне обладнання» № 108589, опубл. 12.05.2015, Бюл. №9;
- визначено раціональні параметри розташування фільтрувальної перегородки відносно ультразвукової хвилі в кавітаційній камері;
- розроблена методика розрахунку резонансних елементів конструкції корпусу фільтра та приводів-випромінювачів, застосування якої передбачає врахування умов їх експлуатації, параметри конструкційних матеріалів та п'єзоелектричні перетворювачі, що застосовуються;
- надані рекомендації раціонального вибору конструкційних матеріалів для корпусних деталей та фільтрувального елемента кавітаційного фільтра.

Впровадження та пропозиції з використання отриманих результатів.

Теоретичні та експериментальні результати роботи також впроваджено у навчальний процес кафедри Прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського в курсах «Основи теорії гідроавтоматики», «Гідроавтоматика та керування», «Гідроавтоматика в мехатронних системах» та при написанні студентських дипломних та магістерських робіт.

Конструкторську документацію з рекомендаціями, отриманими на основі проведеної роботи, було впроваджено у виробництво на підприємстві ПрАТ «Цикорій» в технологічному процесі виготовлення згущеного цикорію, що дозволило збільшити час використання фільтроелементу на 50%.

Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення впроваджено у виробництво «ТОВ Ашер 8» з метою підвищення ефективності технологічного процесу очищення соняшникової олії. Промислові випробування нового технологічного обладнання показали, що термін міжремонтного циклу, при якому необхідна зупинка технологічного процесу для відновлення фільтроелементу, збільшився на 41%, в наслідок чого підвищилася продуктивність та ступінь очищення соняшникової олії.

Особистий внесок здобувача. Обґрунтування мети та завдання досліджень виконано спільно з науковим керівником. Автором виконано аналіз способів очищення рідин та фільтрувальних перегородок, розроблено програми експериментальних досліджень, виготовленні експериментальні стенди, проведені експериментальні дослідження. Обробка та аналіз результатів експериментів повністю виконано автором. Математичне моделювання виконано автором. Впровадження результатів дисертаційної роботи здійснювалося колективом співробітників під науковим керівництвом д.т.н., професора Луговського О.Ф. при безпосередній участі здобувача.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях:

- Всеукраїнська конференція «Актуальні проблеми та перспективи біомедичної інженерії», 15 квітня 2014 р., Київ, Україна;
- XV Міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика», 17–19 вересня 2014 р., м. Мелітополь;
- XIX Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 21–24 травня 2014 р., м. Кіровоград;
- XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 25.06.2014., м. Севастополь;
- XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 25.06.2014., м. Севастополь;
- IV Міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика», 14.10.2015., м. Суми;
- XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2015р., м. Суми;
- XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 2016р., м. Київ;
- XXII Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", 2017 р., м. Черкаси;

- II Міжнародна науково-технічна конференція "Гідро- та пневмоприводи машин" , 2017 р., м. Київ. 2017;
- XVIII Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта” , 2017 р., м. Київ;
- XXIII Міжнародна науково-технічна конференція ”Гідроаеромеханіка в інженерній практиці“, 2018 р., м. Київ;
- Міжнародна науково-технічна конференція «NAPĘDY I STEROWANIA HYDRAULICZNE I PNEUMATYCZNE 2018», 2018 р., м. Kliczkowie;
- XX Міжнародна науково-технічна конференція „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта” , 2019 р., м. Київ;
- XXIV Міжнародна науково-технічна конференція ”Гідроаеромеханіка в інженерній практиці“, 2019 р., м. Київ;
- XXV Міжнародна науково-технічна конференція ”Гідроаеромеханіка в інженерній практиці“, 2020 р., м. Київ.

Публікації. Основні положення дисертації, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виноситься на захист, опубліковано у 14 наукових працях, у томи числі 6 статтях у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у періодичних закордонних виданнях, що входять до WoS), 2 патенти України, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 154 сторінка (з них основного тексту - 117), містить 63 рисунки та 10 таблиць. Список використаних джерел містить 148 посилань на 14 сторінках. Документи про впровадження та інші додаткові матеріали викладені у додатках та представлені на 6 сторінках.

Розділ 1. Сучасний стан проблеми фільтрування рідин

1.1. Способи очищення рідин від механічних забруднень

Вода є одним з найбільш цінних природних багатств у світі. Постійне збільшення населення та інтенсивний розвиток технологій потребують постійного покращення якості технологій для фільтрування рідин.

Розвиток хімічних галузей промисловості призвів до насичення водних ресурсів різними шкідливими речовинами, а підвищення вимог до якості очищення технологічних і стічних вод вимагає широкого застосування різноманітних методів очищення рідких середовищ. В даний час проводиться значна робота по створенню хімічних виробництв, які б не призводили до забруднення водних ресурсів стічними водами, передбачається використання стічних вод в технологічних процесах і в системах оборотного водопостачання [1].

Методи очищення рідких середовищ можливо умовно поділити на деструктивні і регенеративні [2]–[4]. Деструктивні методи очищення полягають у руйнуванні, забруднюючих воду, речовин шляхом їх окислення або відновлення. Утворені при цьому продукти розпаду видаляються з води у вигляді осаду або газів, або залишаються в ній у формі розчинних мінеральних солей. Регенеративні методи дозволяють відділяти та утилізувати окремі речовини, що містяться у воді. Дані методи далеко не завжди очищають воду до такого стану, коли її можна скидати у водойми. У цих випадках воду очищають деструктивними методами.

У всіх випадках очищення, першою стадією процесу є механічна очистка, призначена для звільнення води від зважених і колоїдних частинок. Наступним етапом очищення є видалення з води розчинених у ній хімічних сполук фізико-хімічними, хімічними, електрохімічними, біологічними методами. У багатьох випадках для підвищення якості очищення води доводиться застосовувати комбінації із зазначених методів. В якості найбільш часто використовуваних методів очищення середовищ від грубодисперсних, дрібнодисперсних і

колоїдних частинок застосовуються: відстоювання [5], [6], флотація [7], [8], фільтрування [6], [9], [10], центрифугування [11], коагуляція [5], [12], флокуляція [12]–[14], електричні методи осадження [15]. Дані методи можуть використовуватися як самостійно, так і в різних поєднаннях між собою, наприклад, електролітична флотація, коагуляція і центрифугування [16].

На сьогоднішній день використовується широкий спектр обладнання для очищення рідких середовищ з різною продуктивністю, конструктивними особливостями та вимогами до якості отриманих рідин.

Основними вимогами до фільтрів у процесі очищення являються:

- висока ступінь очищення;
- значна продуктивність;
- можливість відновлення після демонтажу чи під час роботи;
- висока стійкість апаратів до хімічного та термічного впливу;
- значний час роботи без заміни.

Чистота води, яка застосовується у виробництві, є одним з факторів, що визначають якість кінцевого продукту. Особливо високі вимоги пред'являються до технологічної води при виготовленні високоякісних динітратів целюлози, харчових продуктів та ін. Підвищені вимоги, що пред'являються до якості води, використовуваної в технологічному процесі, є основною причиною складності створення замкнених водяних систем.

Для видалення забруднень з рідин можуть використовуватися різні методи, засновані на хімічних, фізико-хімічних та фізичних процесах [17]–[19]. Хімічні методи полягають в застосуванні різних речовин, що вступають з наявними в рідині включеннями в хімічні реакції, і наступному видаленні продуктів, що утворилися в результаті цих реакцій. Фізико-хімічні методи засновані на процесах коагуляції, адсорбції або селективного розчинення забруднень. Різновидом адсорбційних процесів є іонообмінний процес. Фізичні методи очищення рідин включають використання силових полів, що створюються гравітаційними, відцентровими, електричними, магнітними та іншими силами,

очищення шляхом фільтрування рідин через пористі перегородки, а також комбінацію цих методів.

Хімічні і фізико-хімічні методи зазвичай використовуються в сфері нафтопереробки та приготування різних рідин. Фізичні методи очищення знайшли широке застосування на всіх етапах життєвого циклу робочих рідин. Вибір того чи іншого методу очищення залежить від вимог до чистоти рідини, від фізико-хімічних властивостей забруднень, що містяться в ній, від місця установки і умов експлуатації, застосовуваних для цієї мети, очисних пристроїв.

1.1.1. Гравітаційне осадження

Гравітаційне очищення шляхом відстоювання є найбільш простим методом очищення [5], [6], [20]. Гравітаційне осадження або відстоювання застосовується для очищення від пилу, механічних домішок, суспензій і емульсій. Цей процес не забезпечує очищення від високодисперсних частинок і характеризується невеликою швидкістю осадження, тому його використовують переважно для часткового розділення неоднорідних систем. Цей процес не вимагає спеціального обладнання і може бути реалізований в будь-якому резервуарі. Недоліком цього методу є тривалість процесу очищення і неможливість його застосування в рухомих приладах.

Сутність відстоювання полягає в тому, що пил, суспензію або емульсію пропускають через камеру, на дно якої під дією сили тяжіння осідають зважені частинки. При відстоюванні повинні дотримуватися дві основні вимоги: середній час перебування потоку суспензії в апараті має дорівнювати або бути більше тривалості осадження частинок; лінійна швидкість потоку в обладнанні повинна бути значно меншою за швидкість осадження. Недотримання першої вимоги призводить до того, що частки не встигають осісти на дно, а другого - до того, що у апараті виникають вихрові потоки, які піднімають осаджені частини з нижньої частини апарату, переміщаючи їх в напрямку виходу очищеної рідини.

1.1.2. Очищення під дією відцентрових сил

Відцентрове очищення також вимагає суттєвої різниці щільності робочої рідини і забруднень. Ефективність відцентрової очистки залежить від в'язкості робочої рідини і зменшується при зниженні температури. Перевагами відцентрової очистки є сталість пропускної здатності і гідравлічного опору, можливість безперервної їх експлуатації завдяки самоочищенню, а недоліками - складність виготовлення, потреба в сторонніх джерелах енергії для приводних центрифуг або необхідність відбору частини рідини з гідравлічної системи для реактивних центрифуг [21]–[23].

Для здійснення цього процесу до твердої фази необхідно докласти відцентрові сили, що досягається введенням потоку в поле відцентрових сил. Для створення поля відцентрових сил в техніці використовуються два прийоми. При першому - обертальний рух потоку рідини (газу) забезпечується в нерухомому апараті, а при другому - потік прямує в обертовий елемент апарату або машини, в якому потік обертається разом з ротором. У першому випадку здійснюється циклонний процес осадження, у другому – центрифугування [11].

Електро-імпульсне очищення є досить перспективним способом видалення з рідини забруднень [15]. Електричні очисники мають порівняно невеликі габаритні розміри, не змінюють в процесі експлуатації пропускну здатність і гідравлічний опір, дозволяють автоматизувати процес очищення. Однак ці пристрої мають досить складну конфігурацію, вимагають досить кваліфікованого обслуговування, здатні знижувати ефективність очищення в разі наведення електричних зарядів в електроізоляції електродів, вимагають використання зовнішніх джерел високої напруги. Ці недоліки стримують на даному етапі застосування даних систем.

Очищення робочої рідини в магнітному полі обмежується видаленням частинок забруднень, що володіють феромагнітними властивостями. Для створення магнітного поля можуть застосовуватися постійні магніти або електромагніти, причому перші при однакових габаритних розмірах здатні створити більш високу напруженість магнітного поля. До переваг магнітного

очищення відноситься можливість уловлювання вельми дрібних феромагнітних частинок (до 0,5 мкм), які практично не затримуються іншими засобами очистки, але призводять до каталітичного впливу на процеси окислення робочої рідини. Недолік очищення в магнітному полі - вузька область застосування, обмежена видаленням з робочої рідини тільки феромагнітних забруднень і агрегованих з ними частинок.

1.1.3. Фільтрування як спосіб очищення рідин

Найбільш застосовуваним методом очищення рідини, повсюдно вживаних в даний час, є її фільтрування[6], [9], [24], [25].

Фільтрування – процес розділення неоднорідних систем за допомогою пористих перегородок, які затримують одне середовище, а пропускає інше, під дією зовнішніх сил.

Фільтрування широко використовується у різних галузях промисловості, наприклад, для видалення забруднень з робочих рідин, питної води та ін. Ефективність очищення цим методом практично не залежить від властивостей частинок забруднень і пов'язана виключно з співвідношенням розмірів цих частинок з розмірами пор фільтрувальної перегородки.

Фільтрування є гідродинамічним процесом, швидкість якого прямо пропорційна різниці тисків, створюваних по обидві сторони фільтрувальної перегородки і обернено пропорційна опору, який створюється рідиною при її русі через пори перегородки і шар утвореного осаду. Різниця тисків створюється за допомогою компресорів, відцентрових насосів і вакуум-насосів, а також за рахунок гідростатичного тиску суспензії.

Однак на роботу фільтрів істотний вплив роблять властивості рідини (в'язкість, електропровідність, присутність поверхнево-активних речовин і т.п.). Фільтри мають просту конструкцію і можуть експлуатуватися в широкому діапазоні робочих тисків. Їх недоліком є необхідність періодичного відключення для заміни або очищення фільтроелементів.

1.2. Фільтрувальні перегородки

Фільтрувальні перегородки являються основою процесу фільтрування. Саме вони найбільш впливають на продуктивність, ступінь фільтрування та технологічні особливості фільтрів. Фільтрувальні перегородки мають наступні вимоги [26], [27]:

- фільтрувальна перегородка повинна забезпечувати задану ступінь фільтрування рідини і при цьому не створювати значного опору потоку;
- фільтрувальна перегородка повинна бути міцною та не руйнуватися під дією потоку. Гнучкі перегородки можуть розтягуватися, але повинні відновлювати початкову форму після зняття навантаження;
- фільтрувальні перегородки повинні бути термостійкими для можливості фільтрування в умовах підвищених температур;
- фільтрувальна перегородка повинна бути корозійностійкою для можливості роботи в агресивних середовищах.

Вимоги, що пред'являються до фільтрувальних перегородок, залежать від способу фільтрування, для якого вони застосовуються. У разі фільтрування з утворенням осаду перегородки повинні мати мінімальну адгезію до осаду. Перегородки, що застосовуються в об'ємних фільтруючих елементах, повинні володіти високою пористістю і їх товщина повинна бути достатньою для затримання якомога більшого числа частинок твердої фази і збільшення тривалості циклу фільтрування.

Частинки твердої фази затримуються не тільки механічно. Дрібні частинки адсорбуються також поверхнею волокон фільтрувальної перегородки. Тому здатність затримувати тверді частинки залежить від фізико-хімічних властивостей перегородки і твердої фази суспензії [28]. Перегородки для поділу суспензії з конкретними фізико-хімічними властивостями вибирають експериментальним шляхом.

Фільтруючі перегородки можуть бути гнучкими або негнучкими. За способом виготовлення гнучкі фільтруючі перегородки підрозділяються на

тканинні і нетканинні. До перших відносяться фільтрувальні тканини і сітки. Негнучкі фільтрувальні перегородки підрозділяються на жорсткі, що складаються з пов'язаних між собою елементів, таких як кераміка, пористі метали та пластмаси і нежорсткі, що складаються з не пов'язаних між собою елементів. До останніх відносяться піщані і гравійні фільтри, що застосовуються для очищення води і стічних вод.

У хімічній промисловості найбільшого поширення набули гнучкі тканинні фільтруючі перегородки, які можна застосовувати на механізованих фільтрах. Фільтрувальні тканини виготовляють з різних волокон рослинного або тваринного походження, синтетичних (хімічних) волокон, металів, азбесту, скла. Довгий час основним видом сировини для виготовлення фільтрувальних тканин були натуральні волокна: бавовна, льон, вовна, шовк. В даний час широко використовуються тканини з синтетичних волокон. З синтетичного волокна отримують нитки необмежено великої довжини (філоменти), або відрізки (штапельки), відповідні по довжині волокон бавовни і шерсті (30 ... 150 мм). У першому випадку тканина складається з монопіткки, або декількох скручених разом ниток (комплексні нитки), у другому - з коротких відрізків отримують спочатку пряжу - нитка необмеженої довжини [29]. Тканини виготовляють з двох систем паралельних ниток розташованих перпендикулярно один до одного. Нитки, що йдуть в поздовжньому напрямку, називаються основою, в поперечному - утком. Залежно від взаємного розташування ниток можна виготовити безліч тканин різних видів плетіння [30], [31].

Проникність і ступінь очистки тканини залежать від загальної пористості тканини і розміру пор. Розрізняють відкриту пористість, обумовлену будовою (видом плетіння) тканини, і закриту, обумовлену внутрішньою пористістю ниток. Отже, вид нитки (пряжа, комплексні нитки або монопіткка) істотно впливає на фільтрувальну здатність тканини. Проникність тканини оцінюється повітряпроникністю і гідравлічним опором. Для оцінки фільтрувальних властивостей тканини більш важливим є визначення її гідравлічного опору. Фільтрувальні властивості тканини можна визначити тільки фільтруванням

через неї конкретних суспензій. При цьому слід враховувати, що крім будови тканини на ступінь фільтрування великий вплив мають розмір і форма частинок, адгезійні властивості тканини, величина і поляризація поверхні частинки в середовищі суспензії, напрямок потоків при фільтруванні, вміст твердої фази в суспензії і швидкість осадження частинок твердої фази. Фільтрувальні властивості тканини змінюються також і при повторних фільтруваннях через один і той же зразок. Фільтрувальні властивості тканини знижуються головним чином в результаті зменшення розміру пір всередині ниток [32].

Зниження продуктивності фільтрів через засмічення фільтрувальних тканин враховується коефіцієнтом засмічення тканини [6], який приймається рівним 0,7 ... 0,9 в залежності від ступеня зниження продуктивності фільтра після 10 ... 15-кратного фільтрування суспензії в однакових умовах через не регеновану тканину або при її регенерації в умовах, що імітують процес на зворотному типі фільтра. В ході регенерації фільтрувальні властивості перегородки зазвичай повністю не відновлюються, в зв'язку з чим, опір її зростає, а швидкість фільтрування зменшується. Вивчення кінетики засмічення фільтруючих перегородок можливе або при лабораторних випробуваннях, що складаються з десятків або сотень дослідів на модельній установці, або в результаті тривалих промислових випробувань тканини. Криві кінетики засмічення фільтруючих перегородок, як правило, мають два періоди. У першому періоді спостерігається інтенсивне, а в другому повільне зниження швидкості фільтрування. Іноді в другому періоді швидкість залишається практично незмінною. У першому періоді крива кінетики засмічення описується степеневим рівнянням, у другому - експоненціальним. Число циклів, при якому степенева залежність переходить в експонентну, називається критичним. Для більшості продуктів вона становить 10 ... 40 циклів. Добуток відносних швидкостей фільтрування для обох ділянок кривої кінетики дає вираз для розрахунку коефіцієнта запасу, що враховує засмічення тканини.

В даний час значно зросло виробництво тканин з синтетичних волокон, застосування яких крім зниження витрати натуральної сировини, дає ряд

технологічних переваг. Ці тканини мають більшу корозійну стійкість в агресивних середовищах, ніж тканини з натуральних волокон. Вони мають велику механічну міцність на розрив і стирання. Адгезія осаду до тканин з синтетичних волокон зазвичай нижче, ніж до тканин з натуральних волокон, що полегшує операцію знімання осаду з тканини і покращує умови її регенерації та очищення. Із синтетичних волокон для виробництва фільтрувальних тканин найбільшого поширення набули поліамідні (капрон), поліефірні (лавсан), поліакрілнітрільні (нітрон), поліолефінові (поліпропілен), перхлорвінілові (хлорин), політетрафторетіленові (фторлон), ПВХ. Синтетичні волокна мають різну корозійну і термічну стійкість [33]. У загальному випадку капронові волокна стійкі в лугах, лавсанові - в кислотах, хлоринові і поліпропіленові є універсальними. Великого поширення набули хлоринові, лавсанові і капронові тканини. Для оснащення патронних фільтрів розроблені і випробувані в промисловості рукавні тканини з лавсанової і капронової пряжі. Обидві тканини показали хороші результати по чистоті фільтрату та міцності, мають незначну адгезію до осаду.

1.3. Модель руху рідини через пористу перегородку

Найбільш повний опис процесів, що відбуваються під час фільтрування, можливо навести з використанням теорії багатофазних середовищ [34]–[36]. Однак такі математичні моделі для свого вирішення потребують визначення залежності взаємодії фаз, що викликає значні проблеми. Тому, зазвичай, для вирішення прикладних проблем використовують спрощені моделі.

При фільтруванні рідина проходить через пористу перегородку. Фільтрувальну перегородку можливо представити як шар зернистого матеріалу, скріпленого між собою або не скріпленого [9], [37]–[39]. Частинки створюють канали складної форми, через які рухається рідина. У рівняння, що описує рух рідини через пористу перегородку, не вводиться число Фруда, так як гравітаційні сили настільки малі у порівнянні з силами тертя і тиску, що ними нехтують.

Рівняння подібності, що описує рух рідини через пористу перегородку, записане для числа Ейлера, представляють у вигляді:

$$Eu = c * Re^n \left(\frac{l}{d_{ек}} \right)^m, \quad (1.1)$$

де Re - критерій Рейнольдса; l - характерний лінійний розмір, м; $d_{ек}$ - еквівалентний діаметр каналу в шарі матеріалу, м; n, m - коефіцієнти.

Для ламінарної області ($Re \leq 35$) залежність (1.1) приймає вигляд:

$$Eu = \frac{110}{Re^{0.25}} \cdot \frac{l}{d_{ек}}, \quad (1.2)$$

а для турбулентної ($70 \leq Re \leq 7000$) прийме вигляд:

$$Eu = \frac{5.8}{Re^{0.25}} \cdot \frac{l}{d_{ек}}. \quad (1.3)$$

У рівняннях (1.1) - (1.3) швидкість потоку фільтрату віднесена до суми площ поперечних перерізів каналу до, так званого, вільного перетину. Рух потоку рідини при фільтруванні буває зазвичай ламінарним, що дозволяє записати рівняння (1.2) в явному вигляді:

$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} = \frac{110 \mu}{v \cdot d_{ек} \cdot \rho} \cdot \frac{l}{d_{ек}}. \quad (1.4)$$

Вводячи замість швидкості в каналах v швидкість, віднесену до загальної площі поверхні фільтра v_F , отримують:

$$v_F = v \cdot \varepsilon, \quad (1.5)$$

де ε - частка пустот в шарі матеріалу, або коефіцієнт вільного об'єму. Підставивши в рівняння (1.4) значення швидкості рідини в каналах, можна отримати рівняння швидкості фільтрування:

$$v_F = \frac{d_{ек}^2 \cdot \Delta p \cdot \varepsilon}{110 \cdot \mu \cdot l}. \quad (1.6)$$

З рівняння (1.6) випливає, що при інших рівних умовах швидкість фільтрування прямо пропорційна квадрату діаметра каналів в фільтруючому шарі і обернено пропорційна в'язкості рідини μ .

Продуктивність фільтра можна визначити з рівності

$$dV = F \cdot v_F \cdot d\tau, \quad (1.7)$$

де V - об'єм фільтрату, м³; F - площа поверхні, що фільтрує, м²; τ - час, с.

Зіставивши рівність (1.7) з основним кінетичним рівнянням (1.6), можна виразити швидкість фільтрування у вигляді:

$$\frac{dV}{F \cdot d\tau} = \frac{d_{ek}^2 \cdot \Delta p \cdot \varepsilon}{110 \cdot \mu \cdot l}. \quad (1.8)$$

З останнього рівняння отримуємо опір фільтруючої перегородки в процесі фільтрування

$$R_{\phi} = l \cdot \frac{110}{d_{ek}^2 \cdot \varepsilon}. \quad (1.9)$$

Відношення в рівнянні (1.9) являє собою опір одиниці товщини шару фільтруючого матеріалу і називається питомим опором фільтрувальної перегородки r_{ϕ} і визначається з рівняння

$$r_{\phi} = \frac{110}{d_{ek}^2 \cdot \varepsilon}. \quad (1.10)$$

Питомий опір фільтруючого шару обернено пропорційний квадрату еквівалентного діаметру каналів в шарі і пористості перегородки.

З рівнянь (1.8) - (1.10) після підстановки отримуємо рівняння

$$\frac{dV}{F \cdot d\tau} = \frac{\Delta p}{l \cdot \mu \cdot r_{\phi}}. \quad (1.11)$$

Дане рівняння є основним кінетичним рівнянням процесу фільтрування середовищ через шар фільтруючого матеріалу або через фільтруючу перегородку.

1.4. Можливості регенерації фільтруючих перегородок

Сучасні технологічні процеси вимагають підвищення довговічності та надійності обладнання. Деяка частина промислового обладнання працює з використанням різних рідин, що призводить до підвищення їх ступеня очищення та часу безперервної роботи фільтрувальних пристроїв. Тому питання регенерації фільтрувальної перегородки є досить нагальним для сьогодення [40]–[43].

Усі фільтри мають властивість забруднюватись. Процес відбувається наступним чином. Перебіг поділення рідинних сумішей із твердими частинками, які перебувають в тимчасово нерухомому стані (суспензія), із використанням

фільтрувальної перегородки супроводжується збільшенням гідравлічного опору у процесі її забруднення. Швидкість фільтрування стає меншою, а вологість осаду більшою. Це є однією з основних причин механічного пошкодження і завчасної заміни фільтрувальних елементів. Для відновлення або покращення характеристик і подальшої роботи фільтрувальної перегородки, зазвичай, намагаються провести її регенерацію[44].

Осад на поверхні фільтрувальної перегородки затримується завдяки перепаду тиску, а також силами когезії між частинками осаду та силами адгезії між осадом і перегородкою. В залежності від співвідношення між абсолютними значеннями сил застосовують різні способи відновлення поверхні фільтрувальної перегородки. При відносно малих значеннях сил адгезії та когезії з'являються розсипчасті опади з малим вмістом вологи, що легко видаляються із поверхні фільтрувальної перегородки за допомогою дії сил тяжіння та відцентрових сил[44].

Регенерацію фільтрувальної перегородки варто проводити періодично в самому фільтрі або із повним демонтажем та розбиранням. Розбирання фільтрувальних елементів та їх промивка дозволяє, зазвичай, отримувати достатньо високу якість очищення фільтра, але вимагає зупинення технологічного обладнання на значний час. На сьогоднішній день регенерації на очисних установках піддають, перш за все, малогабаритні фільтри з дорогих матеріалів та ті, що встановлюються у фільтрах особливо важливих об'єктів, наприклад, в масляних, паливних і гідравлічних системах літаків [44], [45].

Отже, якість регенерації у великій мірі визначає продуктивність фільтра, що забезпечує можливість його подальшого використання в технологічному процесі. На сьогоднішній день найбільш поширеними є наступні способи очищення фільтрів: механічна регенерація [46], протиточна регенерація фільтрувальної перегородки [47], імпульсна протиточна регенерація [28], струменева регенерація [48], хімічна регенерація пористих перегородок [28], вібраційна регенерація [28], [49], електрогідравлічна регенерація [28], [49],

ультразвукова кавітаційна регенерація [50]–[52]. Розглянемо та проаналізуємо кожний з них.

1.4.1. Механічна регенерація

Основним принципом механічної регенерації [46] є руйнування та видалення скупчень твердих частинок забруднювача, які затримались у порах фільтрувальної перегородки. За умови збільшення товщини шару забруднення поверхні фільтрувальної перегородки згустки великої товщини знімають з полотна за допомогою ножа або під дією розривних зусиль, тобто, натискаючи полотном валика малого діаметру.

Тонші шари осаду знімають шнурами, що у зоні регенерації сходять з барабана, прибирають забруднення і відправляють його завдяки дії вібрації або при обертанні валика[44].

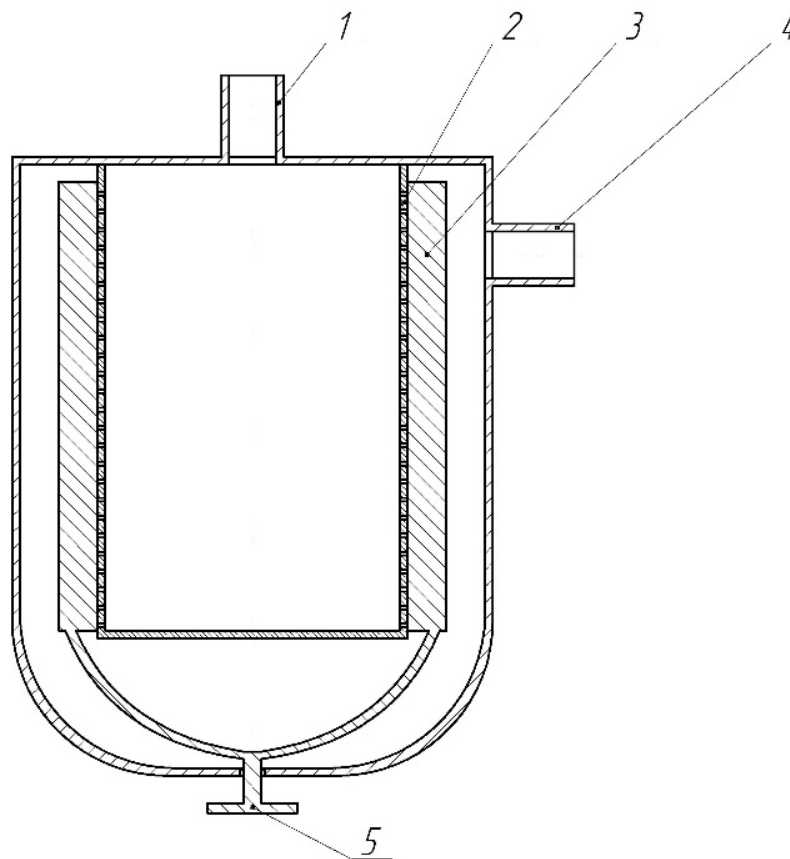


Рис. 1.1. Схема фільтра з механічною регенерацією

На рис. 1.1 представлена типова схема фільтра з механічною регенерацією, яка працює наступним чином. Забруднена рідина подається через патрубок 4. Після збільшення гідравлічного опору внаслідок засмічення пор фільтрувальної перегородки 2 провертають ножі 3 ручкою 5 на один або декілька повних обертів з метою зрушення щільних скупчень частинок забруднювача, які осідають в нижній частині фільтра. Фільтрат отримують через патрубок 1 [44].

Зазвичай механічна регенерація проводиться в автоматичному режимі при накопиченні певного шару осаду або в ручному режимі з певними інтервалами у часі. Однак, при такому способі регенерації відбувається тільки очищення від великих частинок бруду, що не є допустимим при певних технологічних процесах [44].

1.4.2. Протиточна регенерація фільтрувальної перегородки

При протиточній регенерації [47] тверда фаза суспензії, яка затрималась у середині капілярів перегородки фільтра, утворює пористі пробки з нестійким положенням частинок. За умови різких змін швидкості чи напрямку руху рідинного потоку окремі частинки здатні вимиватися, при цьому порушуючи цілісність пробки. В ролі промивного елемента використовують фільтрат, різні рідини, стиснене повітря, пар. Застосування фільтрату здійснюють у таких випадках:

- фільтрат є малоцінним та його можна прибирати разом з вимитими частками;
- використання інших видів/складів рідин із технологічних міркувань є небажаним;
- фільтрування проводять за для згущення суспензії разом з наступним виділенням твердої фази на фільтрах інших типів.

Використання фільтрату в якості промивної рідини значно спрощує процес регенерації, так як при цьому відпадає необхідність в попередній підготовці фільтра перед промиванням і після неї, яку проводять з метою уникнення змішування суспензії з чужорідною промивної рідиною. Однак, в ряді випадків

для відновлення фільтрувальних властивостей перегородки доцільно використовувати спеціальні промивні рідини. Наприклад, при поділі цінної суспензії, коли бажано уникнути навіть невеликих втрат фільтрату, а також при фільтруванні високов'язких суспензій. В останньому випадку, при регенерації високов'язким фільтратом, можна застосовувати барботаж повітрям. Такий спосіб дозволяє значно інтенсифікувати процес і в якості промивної рідини використовувати низьков'язкий розчинник і стиснене повітря [44].

Стандартна схема фільтрувальної установки з протиточною регенерацією перегородки зображена на рис. 1.2. Установка складається з 2-х основних фільтрів $\Phi 1$, $\Phi 2$ та групи вентилів $B1...B6$ [44].

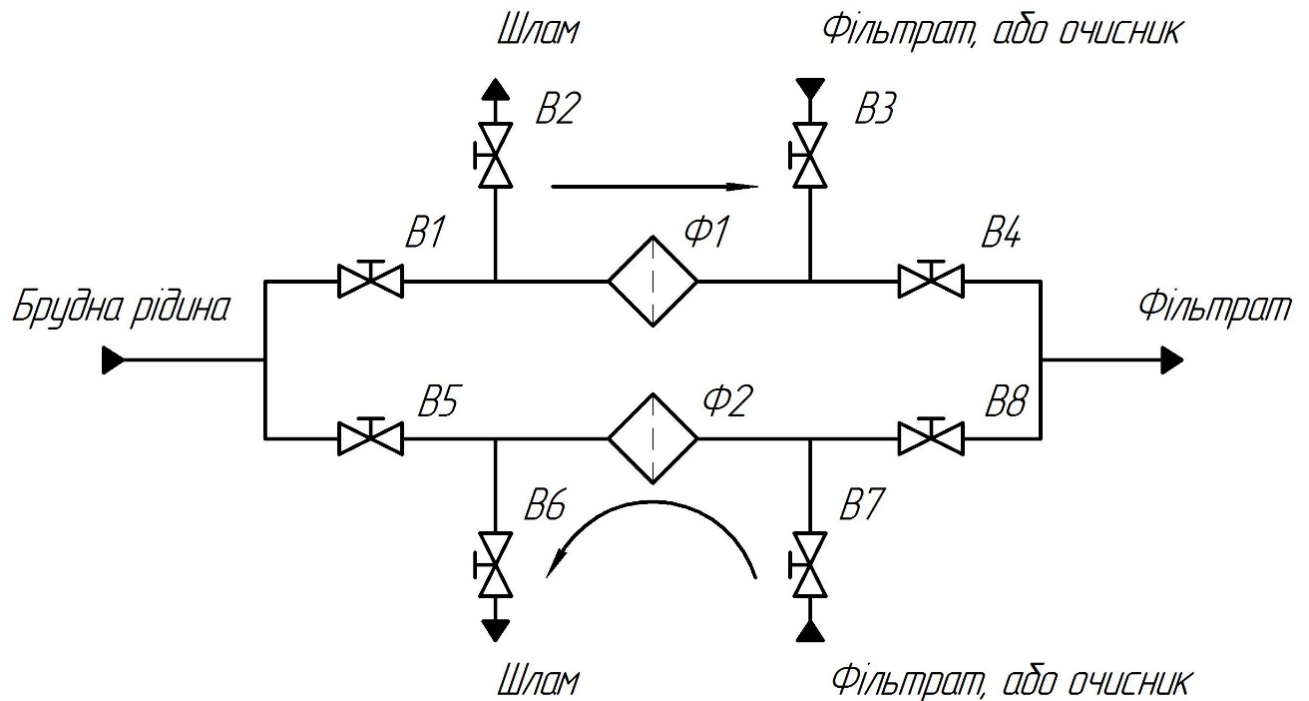


Рис. 1.2. Схема фільтрувальної установки з протиточною регенерацією

При нормальних умовах брудна рідина проходить через відкритий вентиль $B1$ до фільтра $\Phi 1$, в якому відбувається фільтрування, а далі через вентиль $B2$ отримуємо очищену рідину. Вентилі $B2$ та $B3$ закриті. При роботі фільтра $\Phi 1$ на фільтрі $\Phi 2$ може відбуватися як процес очищення, так і їх паралельна робота (вентилі $B6$ та $B7$ закриті, $B5$ та $B8$ відкриті). Під час регенерації фільтра $\Phi 2$ через вентиль $B7$ подається очисник в напрямку, протилежному напрямку подачі суспензії. В ролі очисника може виступати фільтрат, повітря, розчинник та ін. Очисником вимиваються затримані в порах перегородки частки і скидаються в

осад, який знаходиться на поверхні. При цьому утворюється вторинна суспензія, яку в залежності від її цінності і технологічних особливостей виробництва, зливають в каналізацію або повторно обробляють. В останньому випадку вторинна суспензія проходить через допоміжний роздільний апарат, в якому очищується від забруднень. В якості допоміжного роздільного пристрою може служити центрифуга, відстійник або додатковий фільтр. Застосування допоміжного фільтра доцільно лише в тому випадку, якщо вторинна суспензія за своїми властивостями помітно відрізняється від вихідної, наприклад, має більш низьку в'язкість. При цьому пропускна здатність допоміжного фільтра буде в десятки разів більше, ніж основного. Тому фільтр з невеликою поверхнею забезпечить значну тривалість робочого циклу [44].

Допоміжний фільтр застосовують також з метою очищення вторинної суспензії, отриманої при регенерації фільтратом. У такому випадку можна досягти лише грубої очистки. Відповідно, вторинний фільтрат направляють у бак вихідної суспензії для повторного очищення на основних фільтрах [44].

Фільтрувальна установка із протиточною регенерацією перегородки значно спрощується у випадку застосування реверсивного фільтрування. Окремою рисою є позмінна подача суспензії з одного, а потім з іншого напрямку перегородки. Процес фільтрування здійснюється до моменту досягнення граничного значення опору перегородки, після чого відбувається перемикання клапанів фільтра і зміна напрямку подачі суспензії на протилежний. Також у початковий період здійснюється протиточна промивка пористого матеріалу фільтратом та згущена суспензія прибирається із фільтра окремим трубопроводом. Через певний відлік часу клапан виходу згущеної суспензії закривається і відкривається клапан виходу фільтрату та знову починається новий цикл. Отже, реверсивне фільтрування передбачає регенерацію пористих фільтроментів лише фільтратом [44].

Слід зазначити, що протиточною регенерацією перегородок рідко досягається повне відновлення фільтрувальних властивостей. Підвищенню ефективності цього процесу сприяє локалізація ділянок поверхні, які

промиваються, а також застосування імпульсної промивки, що значно збільшує затрати як по часу, так і по економічних показниках [44].

1.4.3. Імпульсна протиточна регенерація

Для збільшення ефективності регенерації фільтрувальної перегородки здійснюють, так зване, імпульсне промивання [28], [53]. Суть імпульсного промивання полягає у створенні короткочасних різких поштовхів рідини стисненим повітрям або електричним розрядом. Пристрій з імпульсною промивкою фільтрувальних елементів повинен мати у зоні фільтрату ковпак для створення повітряної подушки. При регенерації клапан на вихідному патрубку закривається без вимкнення насоса, який подає суспензію. Отже, фільтрат накопичується під ковпаком та стискається повітрям.

На рис. 1.3 представлена типова схема фільтра з імпульсною протиточною регенерацією [53], яка працює наступним чином. Спочатку скидається осад 1 з горизонтального відстійника 2 по трубопроводу 3.

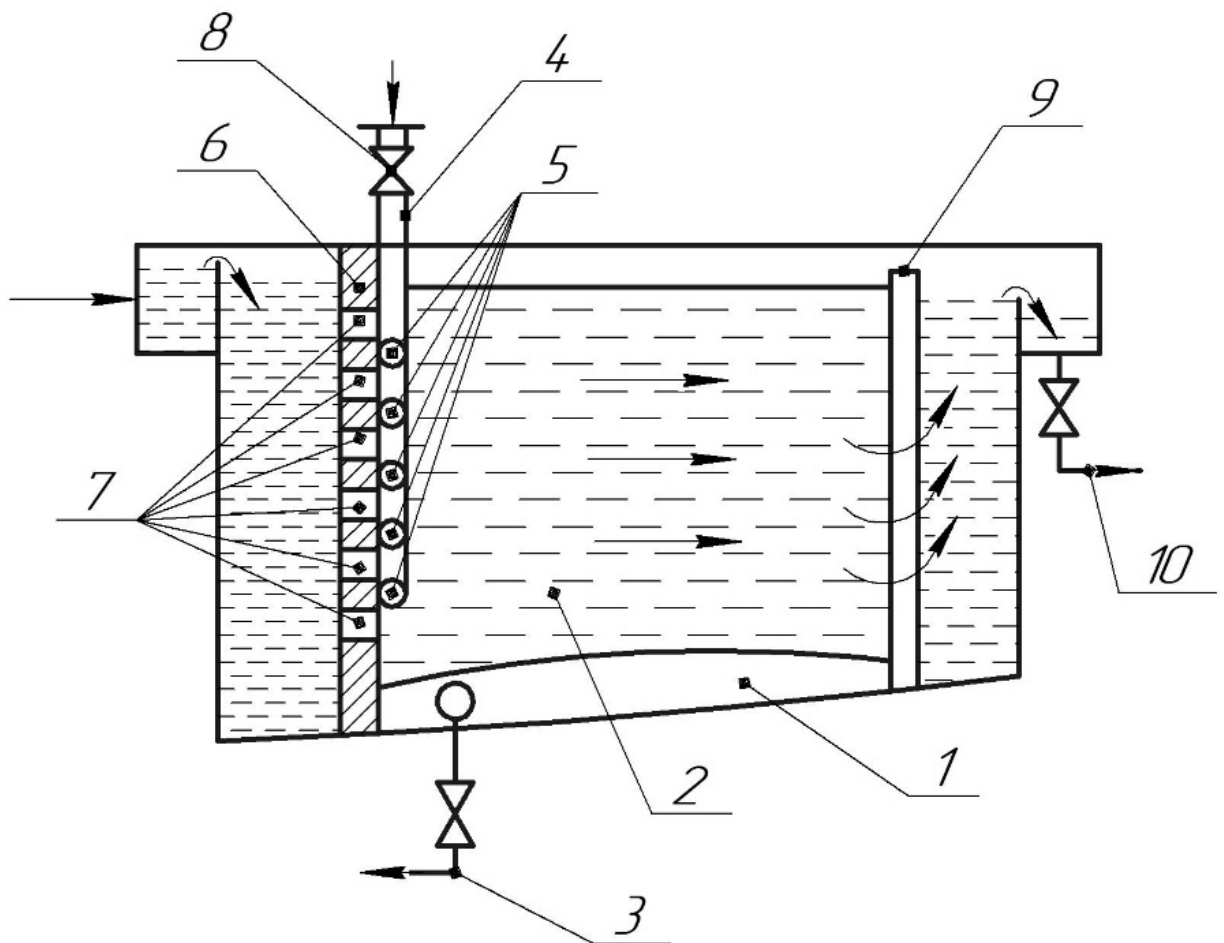


Рис. 1.3. Схема фільтра з імпульсною протиточною регенерацією [53]

Наступним кроком подається промивна рідина по трубопроводу 4 у систему промивних труб 5, які прикріплені на дірчастій водорозподільній перегородці 6 і розташовані між отворів 7 у перегородці 6. Засувкою 8 зменшується або збільшується витрата промивної рідини, що йде на промивку пористої перегородки 9, яка розташована на виході відстояної рідини з відстійника 2. За рахунок зменшення або збільшення витрати промивної рідини створюється пульсуючий рух рідини в горизонтальному відстійнику 2. За рахунок цього відбувається імпульсна промивка пористої перегородки 9. Промивна рідина скидається по трубопроводу 10 [44].

Зазвичай імпульсна регенерація проводиться із будь-якою промивною рідиною. Однак, при такому способі регенерації мають місце великі витрати промивної рідини. Крім того, кожна пориста перегородка промивається окремо або парами, що в сукупності призводить до суттєвих фінансових витрат [44].

1.4.4. Струменева регенерація

Різновидом рідинно-повітряної регенерації фільтрувальної перегородки є струменева регенерація. Вона широко використовується на барабанних, дискових, стрічкових і деяких інших типах фільтрів [48] для видалення осаду з поверхні перегородки та її регенерації. Принцип струменевого промивання наступний. Створені потужні струмені рідини, які спрямовані перпендикулярно або нахилено до поверхні фільтрування (Рис. 1.4). Тобто, фільтр складається із корпусу 1, сітчастих конусів 2, які розміщені на певній відстані один від одного, струменеутворюючих промивних пристроїв 3, розміщених в середині сітчастих конусів 2, камер проміжного фільтрування 4, які знаходяться між сітчастими конусами 2, трубопроводів живлення 5 та підшипників ковзання 6, що утримують порожнистий вал 7 і з'єднують його за допомогою стійок 8 з корпусом 1. Крім цього, конструкція містить патрубок відбору вихідної рідини 9, патрубки відбору твердих забруднюючих частинок 10, патрубки відбору проміжного фільтрату 11 та патрубок відбору кінцевого фільтрату 12.

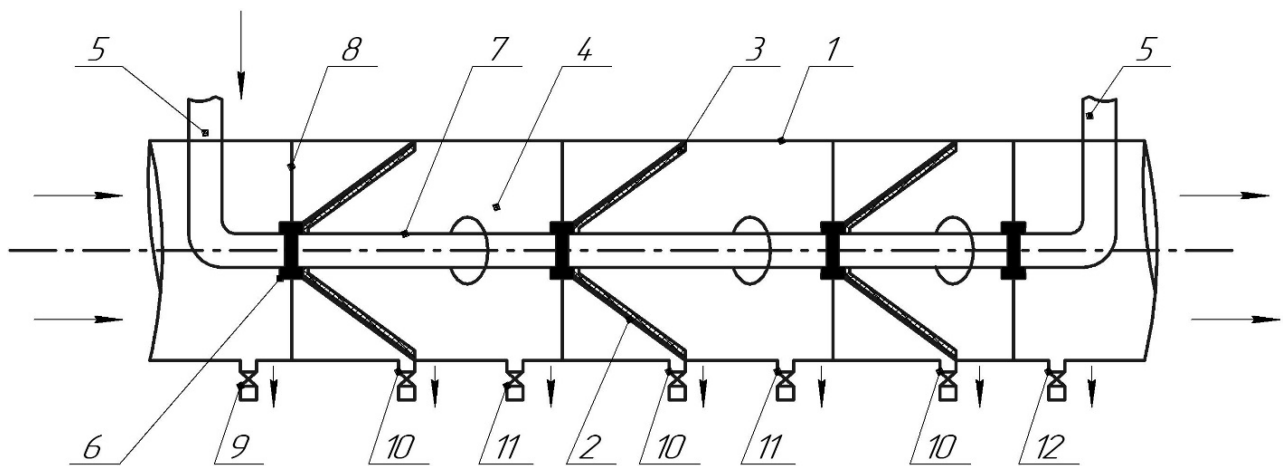


Рис. 1.4. Схема фільтра з струменевою регенерацією [54]

Такий фільтр працює наступним чином. Забруднена механічними частинками рідина, проходячи через корпус 1, фільтрується на сітчастих конусах 2, залишаючи забруднюючі частинки на їх зовнішній поверхні. Регенерація конусів 2 відбувається під дією напірних струменів, які витікають з отворів струменеутворюючих промивних пристроїв 3, що обертаються в підшипниках ковзання 6. Живлення рідиною промивних пристроїв 3 відбувається від напірного джерела через трубопроводи живлення 5, горизонтальна частина яких є порожнистим валом 7, що обертається в підшипниках 6. Під дією струменів промивних пристроїв 3 і основного потоку рідини в корпусі 1 забруднюючі частинки акумулюються біля великої основи сітчастих конусів. Далі, в наслідок дії струменів промивних пристроїв 3, забруднюючі частки обертаються навколо великих основ конусів 2 і під дією різниці тиску в корпусі 1 і атмосфері через патрубок 10 виводяться на зовні. Через патрубки 9, 11 і 12 здійснюється відбір вихідної рідини, проміжного і кінцевого фільтрату [54].

Якість регенерації в такому випадку залежить, на сам перед, від швидкості руху струменів, напрямку подачі промивної рідини, товщини та щільності пористої перегородки. При збільшенні кількості сопел знижується гідравлічний напір промивної рідини, що є небажаним фактором [44].

1.4.5. Хімічна регенерація

Дуже часто використаний фільтрувальний матеріал піддають хімічній регенерації [28], яка ґрунтується на розчиненні осілих у перегородці частинок

суспензії чи зцементованого осаду. Провідне місце такий спосіб займає при регенерації пористих елементів, які після короткочасної експлуатації довгий час перебували на відкритому повітрі. В такому разі з висохлої рідкої фази суспензії кристалізуються мінеральні солі або створюються плівки органічних речовин, що міцно утримують у порах тверді частинки та повністю перекривають дрібні капіляри. Позбавлення поверхні перегородки захисного шару суспензії може вплинути на її матеріал та призвести до окислення. Придатність до регенерації таких елементів погіршується, отже і відновити їхні фільтруючі властивості можливо лише хімічним способом.

Хімічну регенерацію, як правило, проводять на спеціальних регенераційних установках і в рідкісних випадках - на самому фільтрі [19], [41]. Це пов'язано з використанням в якості промивної рідини різних кислот, їдких лугів і інших агресивних рідин, які вимагають застосування апаратів зі спеціальних корозієстійких матеріалів. Для обробки тонких фільтрувальних перегородок, таких, як тканини, сітки, їх занурюють у ванну з промивної рідиною і витримують в ній протягом певного часу. Об'ємні фільтрувальні перегородки (пористі диски, патрони) вимагають продавлювання через них промивної рідини, що пов'язано з необхідністю підведення всередину пористої системи свіжих порцій розчинника, а також механічного вимивання нерозчинної частини забруднювача. Для інтенсифікації процесу хімічну регенерацію можна поєднувати з механічною, перемішуючи розчинник мішалкою і вводячи в систему пульсації, вібраційні і навіть ультразвукові коливання.

Схема пристрою для хімічної регенерації [55] наведена на рис. 1.5. Натрій-катионітовий фільтр 1 виключають на регенерацію і до нього по трубопроводу 2 подають регенераційний розчин NaCl в кількості 10% від робочої продуктивності фільтру. В процесі регенерації з фільтру по трубопроводу 3 до реактору 4 виводяться солі жорсткості у вигляді розчинів CaCl_2 і MgCl_2 . До реактору також подають суміш реагентів 5 вапна (Ca(OH)_2) для коректування рН розчину в межах 8,9-9,3 і соди (Na_2CO_3) для осадження солей жорсткості. Розчин соди додають в кількості 0,8-1,1 до сумарного вмісту іонів кальцію і магнію. В

результаті реакцій осаджуються нерозчинні солі жорсткості (CaCO_3 і MgCO_3) у вигляді шламу 6, а отриманий розчин NaCl можна застосовувати для подальшої регенерації фільтру. Безповоротні втрати рідини зі шламом відновлюються розчином NaCl по трубопроводу 7. Шлам можна утилізувати у вигляді міцного будівельного матеріалу. Очищений регенерат збирається в бак 8 і насосом 9, за необхідністю, подається на регенерацію натрій-катіонітових фільтрів.

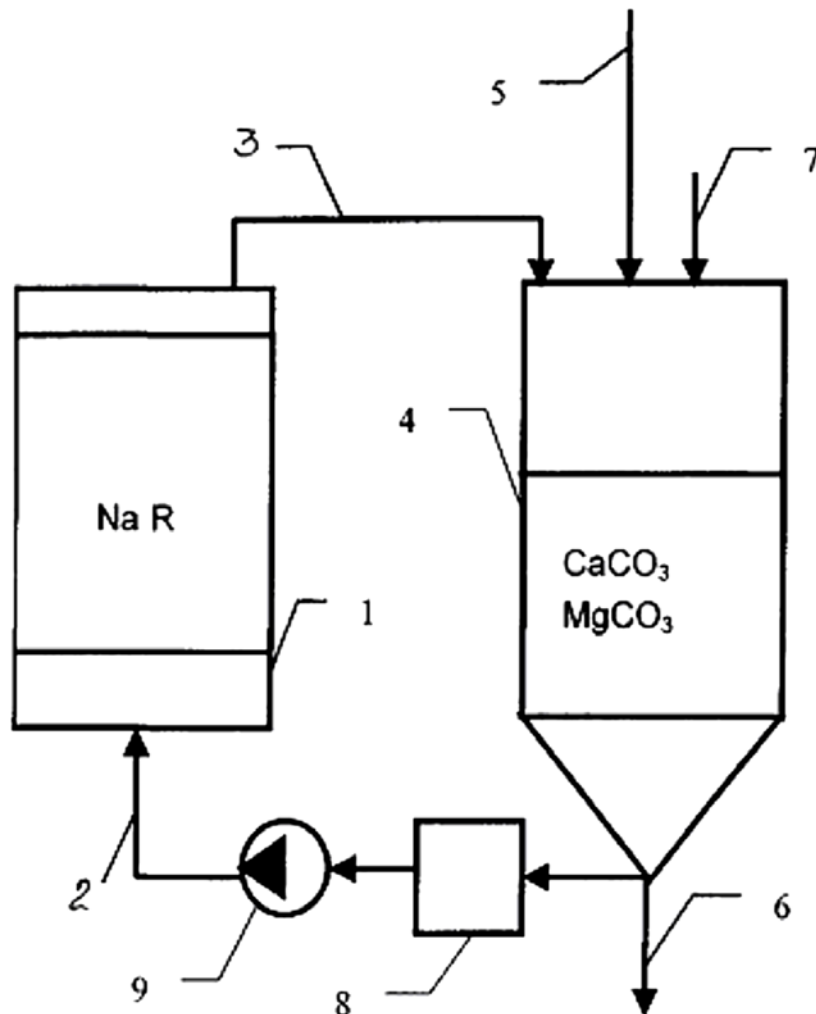


Рис. 1.5. Схема фільтра з хімічною регенерацією [55]

При хімічній регенерації до промивної рідини пред'являють дві основні вимоги: інертність по відношенню до матеріалу фільтрувальної перегородки і здатність розчиняти забруднення перегородки. Виходячи з цих вимог, хімічній регенерації найчастіше піддають пористі перегородки з синтетичних матеріалів, кераміки, металокераміки деяких видів. Бавовняні тканини мало стійкі до дії кислот, втрачають міцність при лужній обробці, тому хімічна регенерація їх практично неможлива. Тобто, такий спосіб регенерації є досить шкідливим як

для людини, так і для матеріалу фільтроелементу, а також є економічно не вигідним [44].

1.4.6. Вібраційна регенерація

Використання пружних коливань [49] з метою фільтрування суспензії дозволяє не лише здійснити вібраційну регенерацію перегородки, а також інтенсифікувати і сам процес фільтрування. Якщо суспензії чи перегородці у процесі фільтрування надавати зворотно-поступальний рух, то можна здійснити безперервний процес поділу суспензії, який протікатиме з найбільшою швидкістю, що визначається тільки початковим гідравлічним опором фільтрувальної перегородки. За період повного коливання (прямий і зворотний хід), який здійснюється суспензією або перегородкою, відбуваються процеси фільтрування та регенерації. При фільтруванні (дія прямого ходу) на поверхні перегородки відкладаються тверді частинки забруднювача. Під час зворотного ходу відбувається протиточна регенерація. Як результат, тверді частинки відриваються від перегородки, а потім несуться потоком суспензії або осідають у нижні частини апарату, де періодично видаляються.

На рис. 1.6 представлена типова схема фільтра з вібраційною регенерацією [56] .

Вібраційний фільтр складається з корпусу 1, в якому розташований циліндричний перфорований фільтруючий елемент 2, забірний патрубок 3, який входить в фільтруючий елемент 2 та направлений до верхньої пластини фільтруючого елемента 4, вібратора 5, який встановлений на платформі 6. Для підтримання платформи встановлені амортизатори 7. Платформа 6 з'єднана з вібратором 5 через шток 8. В нижній частині корпусу фільтра 1 розташований патрубок виведення фільтрату 9. В нижній частині фільтруючого елемента 2 розташована хвилевідбивна сітка 10 та патрубок відводу шламу 11. Фільтр працює наступним чином. Рідина через забірний патрубок 3 під напором поступає в фільтруючий елемент 2, потрапляє на верхню пластину фільтруючого елемента 4 і потік рідини змиває бруд, який знаходиться під цією пластиною, в

нижню частину фільтруючого елементу. Вмикається вібратор 5, який через шток 8 передає вібрацію на фільтруючий елемент 2. Внаслідок взаємодії верхньої пластини фільтруючого елементу 4 з рідиною виникає стійка хвиля, яка відбиваючись від хвилевідбивної сітки 10, утворює зворотну хвилю, що дозволяє частині твердих включень суспензії, не потрапляючи на стінку, накопичуватись в нижній частині фільтруючого елементу. Рідина, яка містить різноманітний бруд, проходить через фільтруючий елемент 2 та через патрубок виведення фільтрату 9 подається в напірний трубопровід машини. Бруд, який залишився на фільтруючому елементі, під дією власної ваги осідає в нижній частині фільтруючого елементу, звідки видаляється через патрубок виведення шламу 11 на зовні [44].

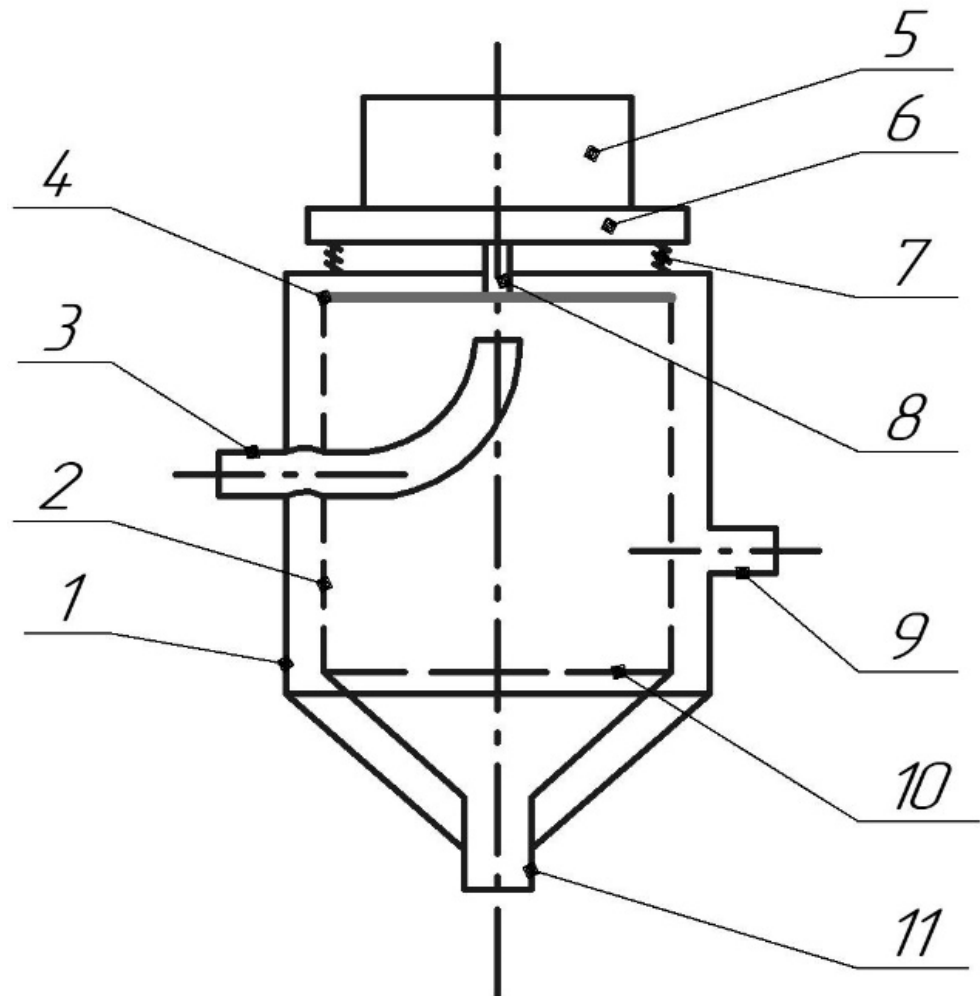


Рис. 1.6. Схема фільтра з вібраційною регенерацією [56]

Вібраційні фільтри забезпечують надійну регенерацію перегородки порівняно, наприклад, з пульсуючими. Однак такі фільтри мають не велику поверхню, що обумовлено складністю конструкції та великими зусиллями, які виникають при вібруванні фільтрувальної системи [44].

1.4.7. Електрогідравлічна регенерація

Ще одним видом імпульсної протиточної регенерації фільтрів є електрогідродинамічний спосіб [49]. Завдяки електричному розряду у рідині виникає потужний гідравлічний удар, який обумовлюється миттєвим випаровуванням частини рідкого середовища між іскророзрядниками. Ударна хвиля характеризується зоною підвищеного тиску, слідуною за нею, зоною пониженого тиску. Відповідно, проходячи крізь пори фільтрувальної перегородки, вона зрушує щільні скупчення затриманих частинок, проштовхуючи їх спершу до виходу, а потім розтягуючи вздовж капілярів подальшим більш слабким зворотним рухом рідини в зоні зниженого тиску.

Приклад електрогідравлічного пристрою [57] показано на рис. 1.7. Пристрій має електроізолюючі елементи, встановлені в місцях з'єднання з трубопроводом, виконані з діелектричного матеріалу і з'єднані провідником з одним з електродів розрядника. При цьому електрод розрядника електрично з'єднаний з трубопроводом або заземлений.

Пристрій містить фільтр 1, ізольований від трубопроводу 2 електроізолюючими елементами 3, розрядник 4, електроди якого пропущені за допомогою ізоляційної пробки 5 через стінку всередину трубопроводу. Один електрод 6 розрядника з'єднаний з корпусом фільтра проводом високої напруги 7, інший електрод 8 з'єднаний з трубопроводом провідником 9 [44].

При прокачуванні діелектричної рідини по трубопроводу 2 через фільтр 1, в якому відбувається інтенсивна електризація рідини, фільтр накопичує електростатичний заряд, так як має певну електричну ємність в залежності від розміру. Накопичення зарядів на фільтрі відбувається до напруги, достатньої для пробоя зазору між електродами 6 і 8. При цьому відбувається розряд через

електроди розрядника 4, що створює гідравлічний удар в трубопроводі. Гідравлічний удар викликає виштовхування забруднення з фільтру [44].

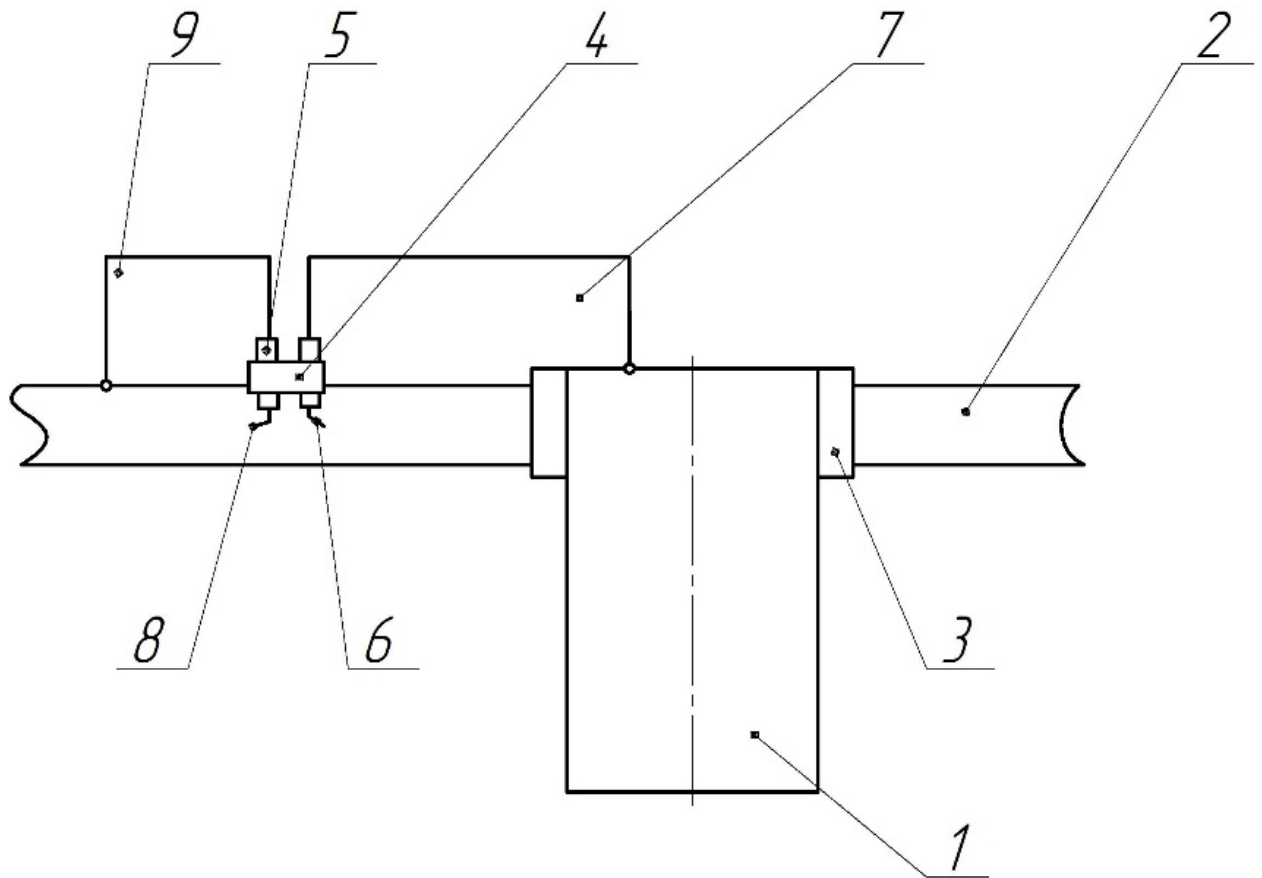


Рис. 1.7. Схема фільтра з електрогідравлічною регенерацією [57]

Слід відзначити, що багаторазовим повторенням імпульсів при електрогідродинамічному способі регенерації можна повністю зруйнувати капілярні пробки, проте для остаточного вимивання частинок необхідний протиточний рух промивної рідини. Тому такий спосіб регенерації повинен поєднуватися з протиточною промивкою фільтрів. Але основним недоліком є те, що застосування електрогідродинамічного методу можливе тільки для неелектропровідних і не вибухонебезпечних рідин [44].

1.4.8. Ультразвукова кавітаційна регенерація

Зі збільшенням частоти пружних коливань можливий перехід у зону ультразвукових коливань, де нижня границя відповідає частоті 20 кГц. Такий перехід характеризується якісним стрибком інтенсивності регенерації [58]. Відомо [50], [59], [60], що разом із поширенням ультразвукових коливань в

рідині спостерігається явище ультразвукової кавітації [52]. Воно являє собою утворення дрібних бульбашок при проходженні хвилі розрідження. Такі бульбашки здійснюють пульсуючі коливання і викликають сильну місцеву турбулізацію середовища. Частина цих бульбашок при проходженні другої фази хвилі, які створює стиснення, сплескуються і це призводить до виникнення значних місцевих температур та тисків. Все це є потужним фактором руйнування твердих частинок на стінках капілярів перегородки та вимивання їх проточною рідиною.

Зазвичай ультразвуковій регенерації піддають сітчасті фільтри [51], які мають незначний гідравлічний опір і дозволяють досягати великої продуктивності при невеликій поверхні фільтрування.

Пристрій, що здійснює ультразвукову кавітаційну регенерацію фільтроелементів [61] наведено на рис. 1.8. У горизонтальну циліндричну камеру встановлюють фільтроелемент, який обертається від електроприводу 4. У камеру 8 подається кранами 9 і 10 очищаюча рідина від відцентрового очисника рідини. На ультразвуковій випромінювачі 2 надходить напруга від ультразвукового генератора 3. Фокусуючий ультразвуковий випромінювач дозволяє створити необхідну інтенсивність ультразвуку на поверхні фільтроелемента малою потужністю генератора без втрат на кавітацію у поверхні випромінювача і в контактному шарі рідини, яка очищається. В результаті, завдяки малому загасанню ультразвукових коливань в циліндричній камері 8 на поверхні фільтроелемента в формі смуги, витягнутої вздовж осі фільтроелемента, створюється практично синфазний фронт необхідної інтенсивності ультразвуку для очищення фільтроелемента. При цьому ультразвук руйнує скупчення забруднювача на поверхні і у порах фільтроелемента. Електроклапан 11 періодично закривається. У момент відкриття електроклапана над поверхнею фільтроелемента створюється ударна хвиля перепаду тиску (відсмоктування) і потік, що створений рідиною, виконує ефективне очищення поверхні та пір фільтроелемента від забруднень.

Головними факторами, які впливають на якість ультразвукової регенерації є тривалість озвучування, відстань до випромінювача та інтенсивність коливань. Необхідна тривалість озвучування залежить від параметрів властивостей суспензії, процесів фільтрування та регенерації перегородки, яка коливається від кількох секунд до десятків хвилин.

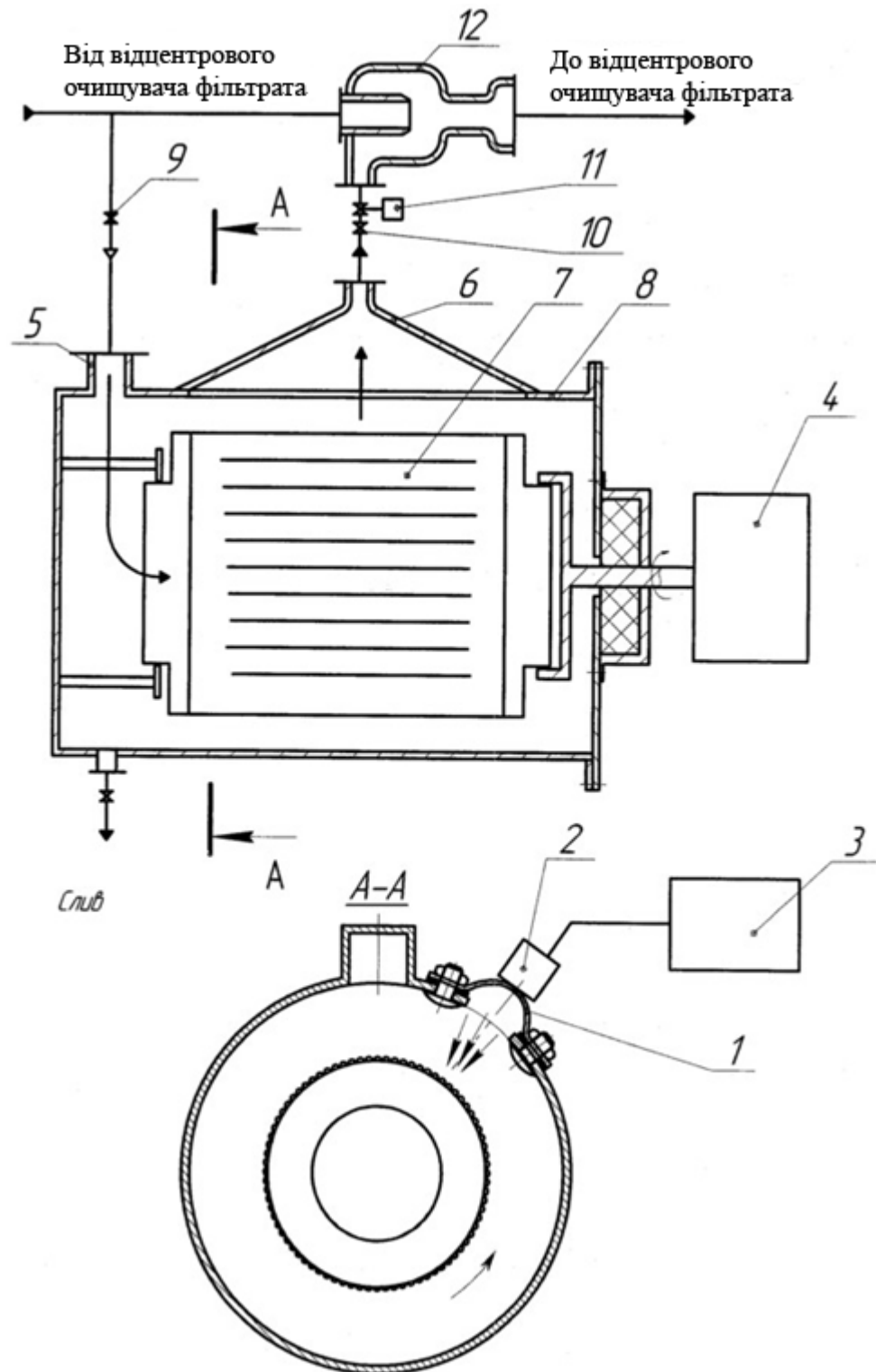


Рис. 1.8. Схема фільтра з ультразвуковою кавітаційною регенерацією [61]

Ультразвуковий спосіб регенерації фільтрувальної перегородки є одним з найбільш ефективних способів гідромеханічного відновлення пористої перегородки [62], [63]. Таким способом можна очищати фільтроелементи зі ступенем очищення 1 мікрометр [64]. Однак, суттєвим недоліком ультразвукової регенерації є її значна енергоємність. Крім того, при поширенні в середовищі звук відбивається, заломлюється, розсіюється і поглинається, що характерно для будь-якого хвильового руху. Тому обробка ультразвуком товстих фільтрувальних перегородок недоцільна. Крім того, разом з швидким загасанням ультразвукових коливань в пористому середовищі зменшується ефективність регенерації по глибині перегородки.

1.4.9. Висновки

Наведений аналіз основних способів регенерації фільтруючих перегородок свідчить, що в деяких випадках для відновлення необхідна досить тривала промивка та значна витрата промивної рідини, інші потребують досить великих фінансових витрат на оплату праці для заміни або очистки [44].

Не всі наведені способи передбачають можливість електронного керування параметрами процесу регенерації, що значно зменшує коло їх використання, особливо в сучасних технологічних процесах.

Аналіз показав, що найбільш доцільним є застосування ультразвукової кавітаційної регенерації фільтрувальної перегородки, оскільки, при такому способі з легкістю можна очистити фільтроелементи з дуже високим ступенем очищення і отримати якісну рідину для подальшої роботи в різних технологічних процесах, однак існують недоліки, які потрібно усунути [44].

1.5. Застосування ультразвукових коливань в технології фільтрування рідини

Для видалення з рідини завислих частинок забруднювача відоме використання ультразвукового поля, яке штучно створюється в обмеженому об'ємі корпусу фільтра [65], [66]. Застосування ультразвукових коливань в

процесі фільтрування дозволяє досягти високого рівня якості очищення рідини, суттєво підвищує продуктивність технологічного процесу і, головне, дозволяє реалізувати ефект самоочищення фільтрувального елементу. Додатково зазначений спосіб фільтрування забезпечує знезараження технологічної рідини від шкідливих та небезпечних мікроорганізмів [67].

Відомі декілька варіантів побудови ультразвукових фільтрів (УЗФ) [52], [68]–[73]. Враховуючи новітні розробки та технічні пропозиції останніх років, представлену в роботах [52], [74] класифікацію УЗФ, можна скорегувати та доповнити (рис. 1.9).

Перш за все, УЗФ можна поділити в залежності від інтенсивності ультразвукового поля, що застосовується. Реалізація УЗФ можлива як із застосуванням ультразвукових коливань, інтенсивність яких не досягає порога виникнення явища ультразвукової кавітації, так і з застосуванням ультразвукових коливань, інтенсивність яких перевищує поріг виникнення кавітації, тобто коли звуковий тиск в хвилі деформації дорівнює або перевищує тиск насичених парів за даних умов. УЗФ з докавітаційним режимом доцільно використовувати при фільтруванні біологічних рідин, в яких в процесі фільтрування необхідно зберегти стан та активність мікробіологічної складової [75].

УЗФ з кавітаційним режимом забезпечують не лише фільтрування від механічних домішок, а і здійснюють вплив на мікроорганізми та бактерії в технологічних рідинах та здатні активувати ці рідини, впливаючи на них на молекулярному рівні [75]–[80].

Ультразвукові коливання в рідину можна вводити безпосередньо з випромінюючої поверхні ультразвукового перетворювача (рис. 1.10). В цьому випадку коливання корпусу фільтру не регламентуються, а інтенсивність коливань задається площею торцевої поверхні ультразвукового перетворювача та амплітудою коливань цієї поверхні. Корпуси подібного технологічного обладнання виконуються із тонкого матеріалу і розраховані на малий статичний тиск. П'єзоелектричні перетворювачі для подібних пристроїв виготовляються за

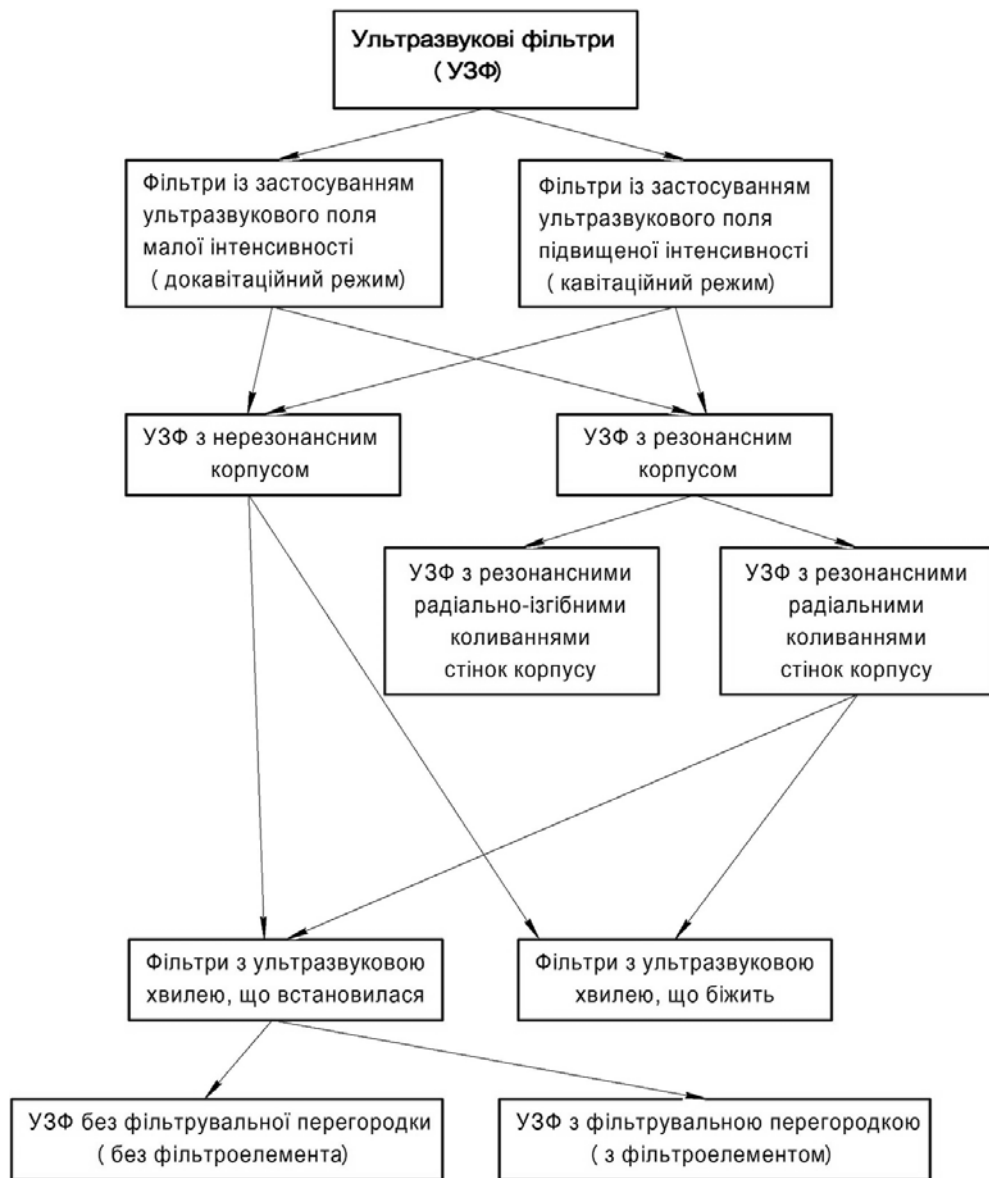


Рис. 1.9 Класифікація ультразвукових фільтрів

акустичною 1/2-хвильовою схемою і не використовують акустичні трансформатори швидкості, тобто є малоамплітудними випромінювачами (рис. 1.11) [78]. Амплітуда коливань випромінюючої поверхні в цьому випадку становить приблизно 3...5 мкм. Зазвичай цей спосіб введення в рідину ультразвукових коливань застосовують в очисних ваннах з малою інтенсивністю ультразвуку (до 8...10 Вт/см²) [81]. В таких ультразвукових пристроях як в докавітаційному режимі, так і в кавітаційному режимі, але малої інтенсивності, ультразвукові хвилі вводяться в рідину з незначними втратами, тобто вдається досить якісно узгодити роботу випромінювача з рідинним навантаженням.

Вдається це завдяки відсутності, за таких умов, на випромінюючій поверхні кавітаційного двофазного прошарку, який поглинає та розсіює ультразвук [82].



Рис. 1.10. Ультразвукове технологічне обладнання з нерезонансним корпусом



Рис. 1.11. Малоамплітудні $\frac{1}{2}$ - хвильові ультразвукові випромінювачі

При малому рівні інтенсивності ультразвукових коливань процес очищення технологічної рідини відбувається за рахунок поступового руху частинок забруднювача в зони пониженого тиску, які утворюються в пучностях хвилі деформації, що встановилася. Концентрація частинок в зонах пониженого тиску призводить до їх коагуляції та осадженню під дією сил гравітації в шламосбірник (Рис. 1.12). В подібному технічному рішенні УЗФ важливо

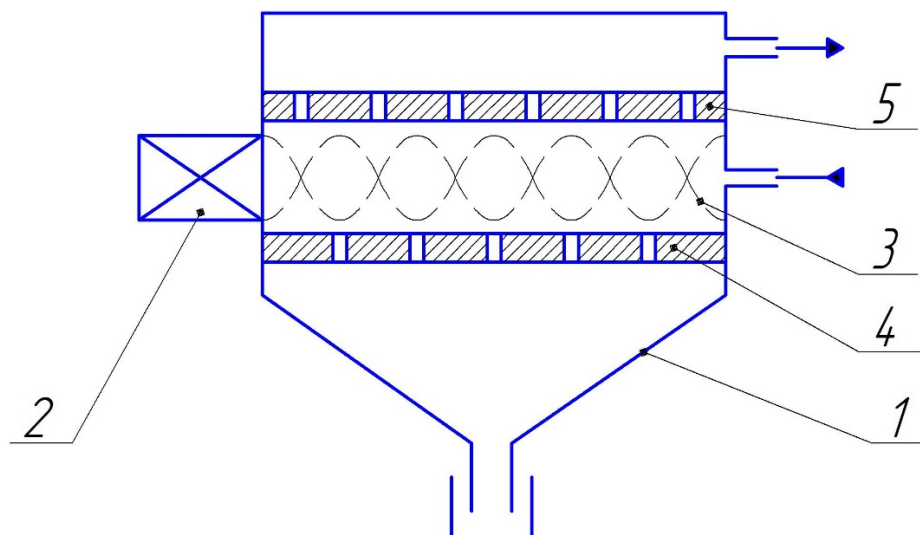


Рис. 1.12. УЗФ без фільтроелементу (1 – корпус; 2 – ультразвуковий випромінювач; 3 – ультразвукова хвиля, що встановилася; 4 – перегородка з отворами для осаджування забруднювача; 5 – перегородка з отворами для відводу фільтрату)

забезпечити паралельність поверхонь випромінювання та відбиття. Розмір корпусу в напрямку випромінювання необхідно виконати резонансним. Важливо, що застосування фільтроелементу в даному випадку не є обов'язковим.

Якщо виникає необхідність створити УЗФ з хвилею деформації, що біжить, протилежну до робочої поверхні випромінювача відбиваючу стінку роблять м'якою, здатною поглинати пружні коливання [52].

В разі необхідності побудови УЗФ з більшою інтенсивністю ультразвукового поля зазвичай застосовують збільшення амплітуди коливань поверхні випромінювання за рахунок застосування акустичних трансформаторів швидкості, наприклад, ступінчастого типу [68]. Але збільшення амплітуди коливань призводить до утворення на поверхні випромінювання кавітаційного прошарку, який знижує ефективність введення в рідину ультразвукових хвиль (рис. 1.13) [78]. Уникнути цієї проблеми вдається за рахунок збільшення площі

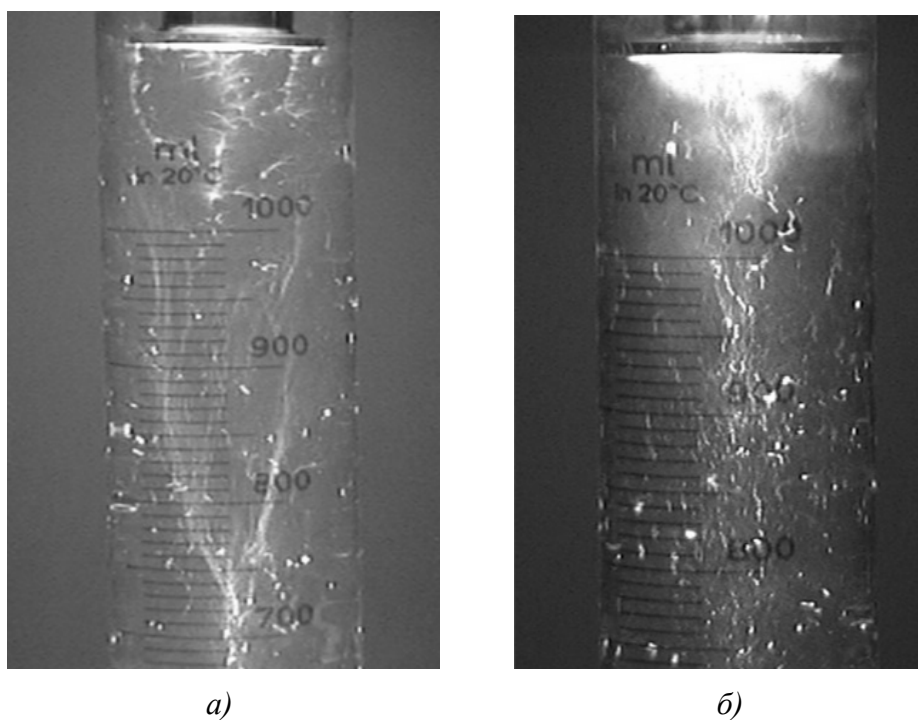


Рис. 1.13. Візуалізація процесу утворення кавітаційного прошарку на поверхні випромінювання (а- мала інтенсивність ультразвуку; б- збільшення інтенсивності ультразвуку до 30 Вт/см²)

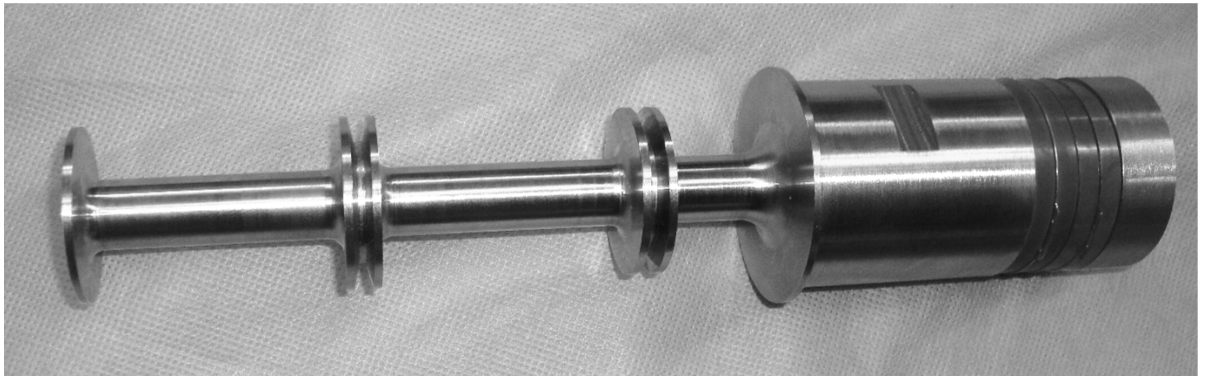


Рис. 1.14. Високоамплітудний ультразвуковий випромінювач з розвинутою багатодисковою поверхнею випромінювання

поверхні випромінювання при збереженні споживаної випромінювачем потужності. Подібні високоамплітудні ультразвукові кавітатори можуть виконуватися з багатодисковою розвинутою поверхнею випромінювання (рис. 1.14) або завдяки виконанню корпусу фільтра резонансним. При цьому корпус,

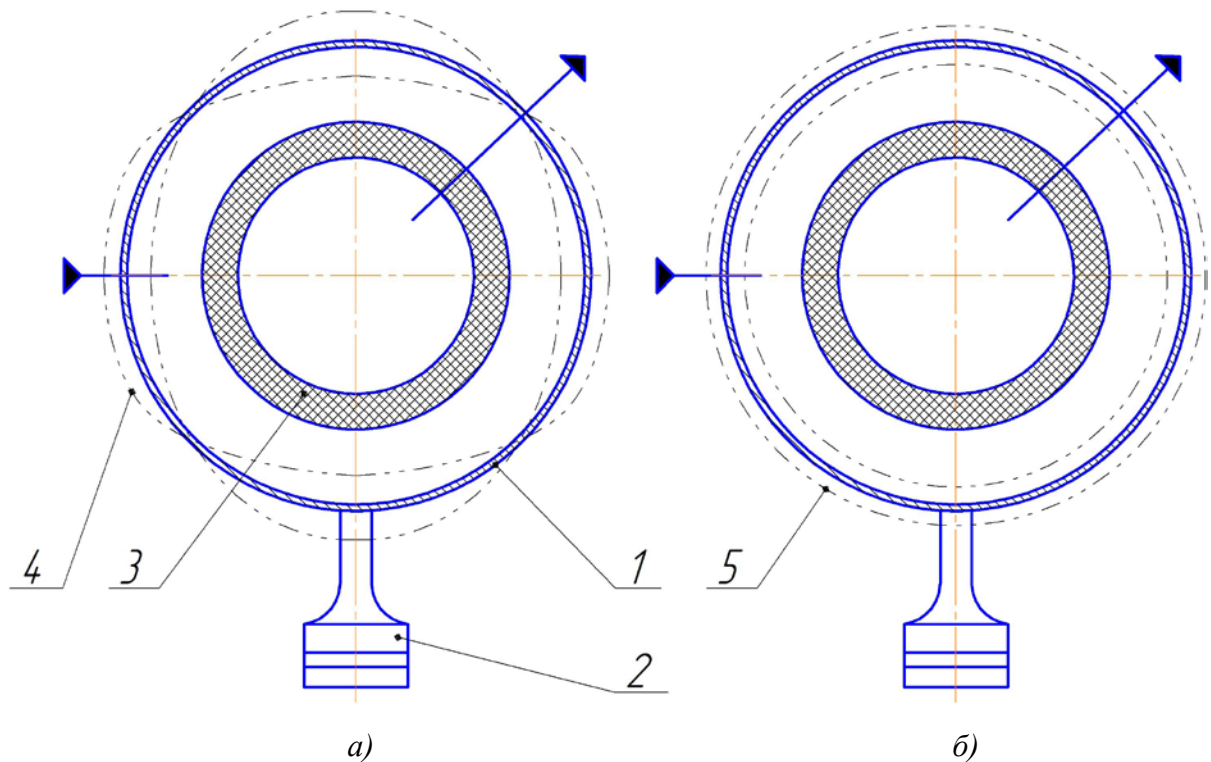


Рис. 1.15. УЗФ з резонансним корпусом (а - зі збудженням радіально-згинальних коливань; б - зі збудженням радіальних коливань)
(1 – циліндричний корпус фільтра; 2 – ультразвуковий привід поздовжніх переміщень; 3 – фільтроелемент; 4 – радіально-згинальна хвиля деформації; 5 – радіальна хвиля деформації)

зазвичай, виконують трубчастим циліндричним і збуджують в ньому радіально-згинальні або радіальні резонансні пружні коливання (рис. 1.15) [70].

В разі збудження радіально-згинальних коливань в заповненому рідиною корпусі утворюється, так зване, дифузне поле, в якому перемішані вузли та пучності. В цьому випадку в корпусі утворюється досить рівномірне середнє за інтенсивністю ультразвукове поле (рис. 1.16) [52].

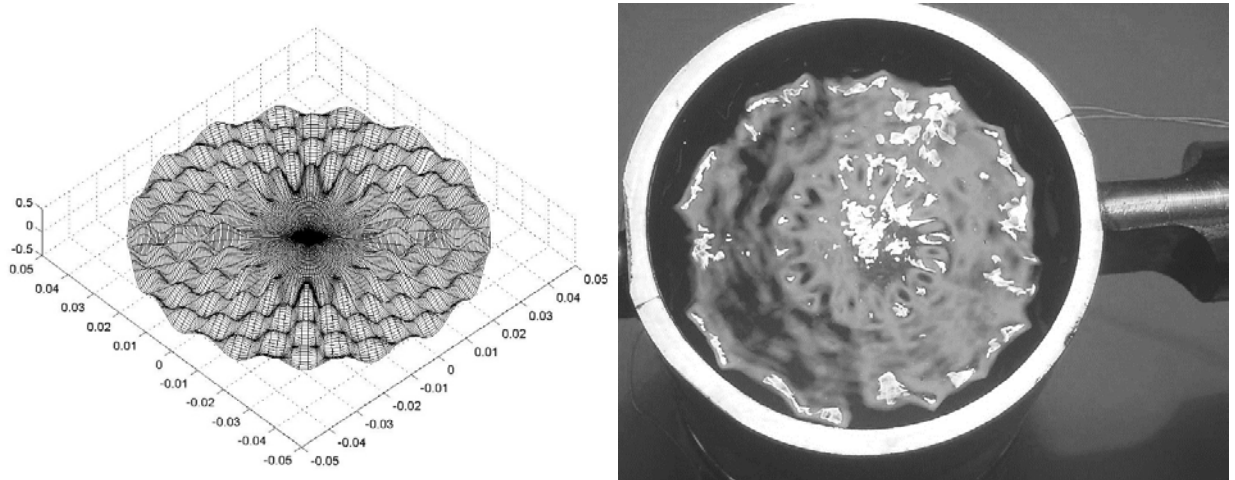


Рис. 1.16. Форма ультразвукового поля в циліндричному корпусі при збудженні резонансних радіально-згинальних коливань

При збудженні радіальних коливань циліндричного корпусу фільтра в рідині здовж осі відбувається суттєве збільшення інтенсивності звукового поля за рахунок фокусуючих властивостей поверхні випромінювання (рис. 1.17) [83]. Висока інтенсивність ультразвукового поля в даному випадку дозволяє досягти нової якості процесу фільтрування, що пов'язано з можливістю інактивації

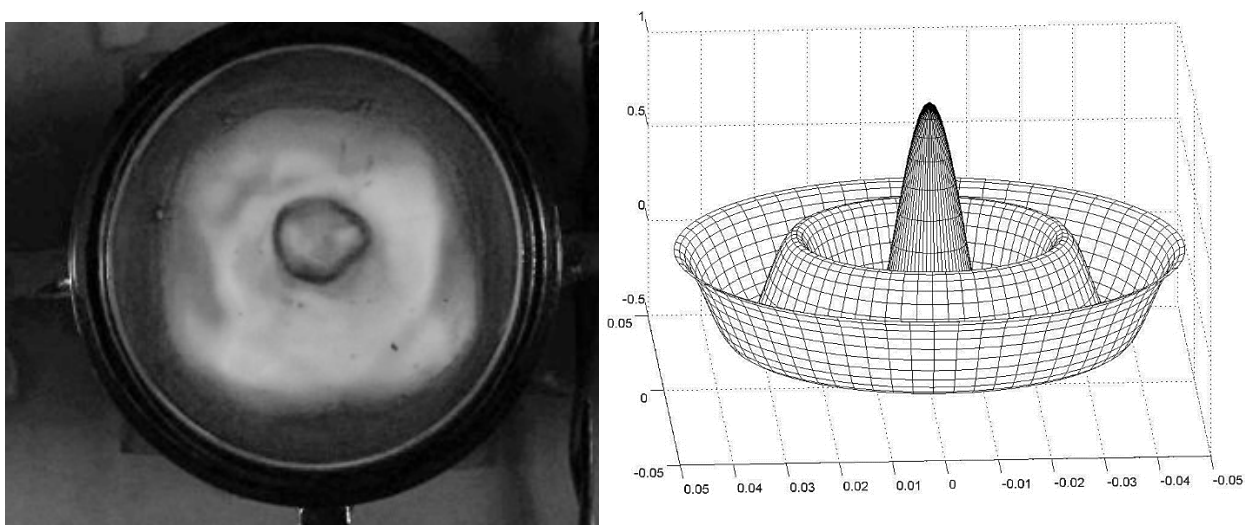


Рис. 1.17. Концентрація ультразвукового поля в циліндричній камері при збудженні радіальної моди коливань

широкого спектру мікроорганізмів та бактерій в розвиненому кавітаційному середовищі.

Товстостінний корпус фільтра в подібному технічному рішенні дозволяє застосувати такі УЗФ в гідросистемах з підвищеним тиском.

Розміщення в утвореному кавітаційному середовищі фільтрувального елементу дозволяє надати процесу фільтрування нові можливості, що пов'язано з ефектами, які супроводжують явище ультразвукової кавітації. При коливаннях та сплескуванні кавітаційних бульбашок утворюються інтенсивні мікротечії, виникають ударні хвилі та енергоємні кумулятивні струмені [84], які активно руйнують частинки забруднювача і не дозволяють засмічуватися порам фільтроелементу, реалізуючи ефект самоочищення фільтроелементу. Високочастотний коливальний процес в рідинному середовищі призводить до зменшення поверхневого тертя у порах фільтроелементу, що дозволяє підвищити продуктивність процесу фільтрування та підвищити його якість. Подібні нові можливості процесу фільтрування дозволяють застосувати УЗФ не тільки в технологічних гідросистемах підвищеного тиску, а і при біологічному та механічному очищенні стічних вод [85]–[88].

1.6. Постановка задачі

Використання ультразвукової кавітації для очищення фільтрувальних перегородок є перспективним. Вказана технологія може підвищити ефективність багатьох технологічних процесів в різних галузях промисловості, медицини та сільського господарства.

Але, для забезпечення ефективної та довготривалої роботи запропонованого ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення необхідно вирішити наступні проблеми:

- здійснити аналіз основних способів очищення рідин методом фільтрування;
- розробити математичну модель процесу взаємодії засміченої рідини з фільтроелементом в умовах ультразвукової кавітації;

- запропонувати та впровадити технічне рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення та розробити методику розрахунку ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення;
- експериментально підібрати кавітаційно стійкі конструкційні матеріали для виготовлення елементів фільтру, здатного тривалий час працювати в умовах кавітаційного середовища;
- розробити рекомендації стосовно режимів збудження акустичної системи фільтра та раціонального розміщення фільтрувального елементу в кавітаційній камері.

Розділ 2. Моделювання процесу фільтрування рідини в ультразвуковому кавітаційному середовищі

2.1. Математична модель процесу руху частинки забруднювача в умовах ультразвукової кавітації

У разі випромінювання у воду плоскої звукової хвилі частотою 22 кГц середнього рівня інтенсивності, при якому кавітаційні явища вже присутні, але ще слабо виражені, уздовж прозорої склянки з резонансним поздовжнім розміром, одержувана форма поля, представлена на рис. 2.1. На рис. 2.1 добре видно, що на випромінюваній поверхні ультразвукового перетворювача ще не спостерігається двофазний кавітаційний прошарок, який призводить до поглинання і розсіювання ультразвукової енергії. Уздовж склянки

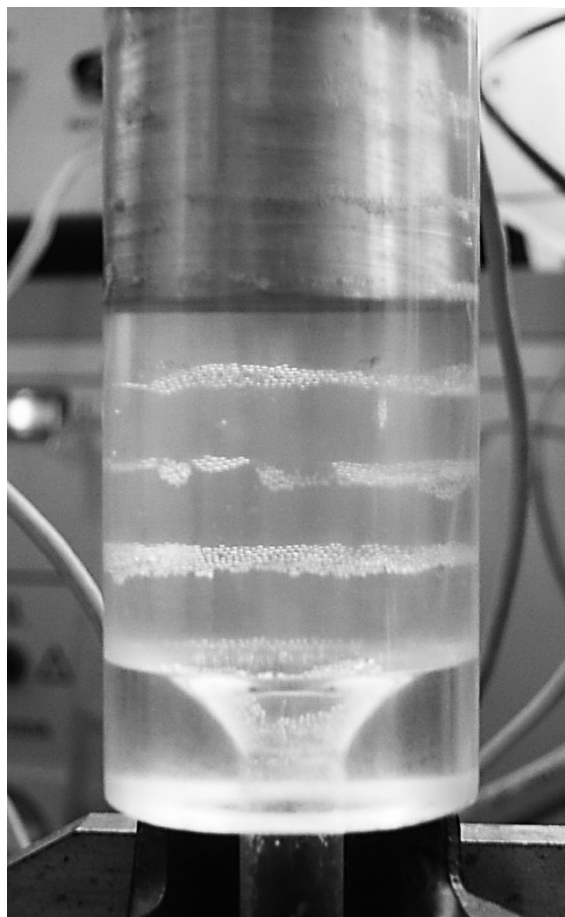


Рис. 2.1 Ультразвукове поле плоскої стоячої хвилі в технологічному об'ємі

встановлюється стояча хвиля деформації, в пучностях якої накопичуються кавітаційні бульбашки. Відстань між прошарками бульбашок становить $\frac{1}{2}$

довжини хвилі. Бульбашки утворюються внаслідок періодичного стиснення і розрідження в звуковій хвилі деформації.

Кавітаційні бульбашки утворюються із зародків кавітації, в якості яких можуть виступати не змочувані тверді частинки, мікробульбашки нерозчинених газів, що знаходяться в мікротріщинах на не змочуваних твердих, межуючих з рідиною, поверхнях і т.п. Кавітаційні парогазові бульбашки збільшуються в розмірах в фазі розрідження і сплескуються в фазі стиснення звукових хвиль після здійснення одного або декількох коливань [89], [90].

Мінімальний розмір зародків, здатних викликати ультразвукову кавітацію, повинен бути вище критичного розміру [89], [91]

$$R_{кр} = \sqrt{3}R_0 \left[\frac{R_0}{2\sigma} \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right]^{1/2}, \quad (2.1)$$

де σ - коефіцієнт поверхневого натягу; R_0 - початковий радіус бульбашки; p_0 - гідростатичний тиск. Наведений вираз справедливий за умови, що тиск насичених парів дуже малий в порівнянні з амплітудним звуковим тиском.

Максимальний розмір зародків, здатних викликати ультразвукову кавітацію, відповідає їх резонансним розмірам, при яких їх власна частота дорівнює частоті, введеній в рідину, звукової хвилі. Резонансний розмір зародка і частота коливань пов'язані залежністю [89], [91]:

$$(2\pi f)^2 = \frac{3\gamma_a}{\rho R_{рез}^2} \left(p_a + \frac{2\sigma}{R_{рез}} \right), \quad (2.2)$$

де f - частота звукових коливань; $R_{рез}$ - резонансний розмір зародка; γ_a - показник адіабати; ρ - щільність незбуреної рідини; p_a - звуковий тиск, що створюється звуковим полем.

У стоячій звуковій хвилі парогазові бульбашки, які мають розміри менше $R_{рез}$, пульсують в фазі з коливаннями тиску і зміщуються до пучностей тиску, а при розмірах, що перевищують $R_{рез}$, переміщуються до вузлів тиску. Швидкість руху бульбашок визначається залежністю [68]

$$v_{\text{пер.пуз}} = \frac{R_0^2}{10\mu \left(p_0 + \frac{4\sigma}{3R_0} \right)} p_a \frac{\partial p_a}{\partial x_k}, \quad (2.3)$$

де μ - коефіцієнт в'язкості рідини; x_k - просторова координата.

Трансляційний рух бульбашок до вузлів тиску стоячої звукової хвилі призводить до коагуляції бульбашок в цих зонах, тобто до збільшення їх розмірів. Такі великі бульбашки, перебуваючи в зоні з практично нульовим

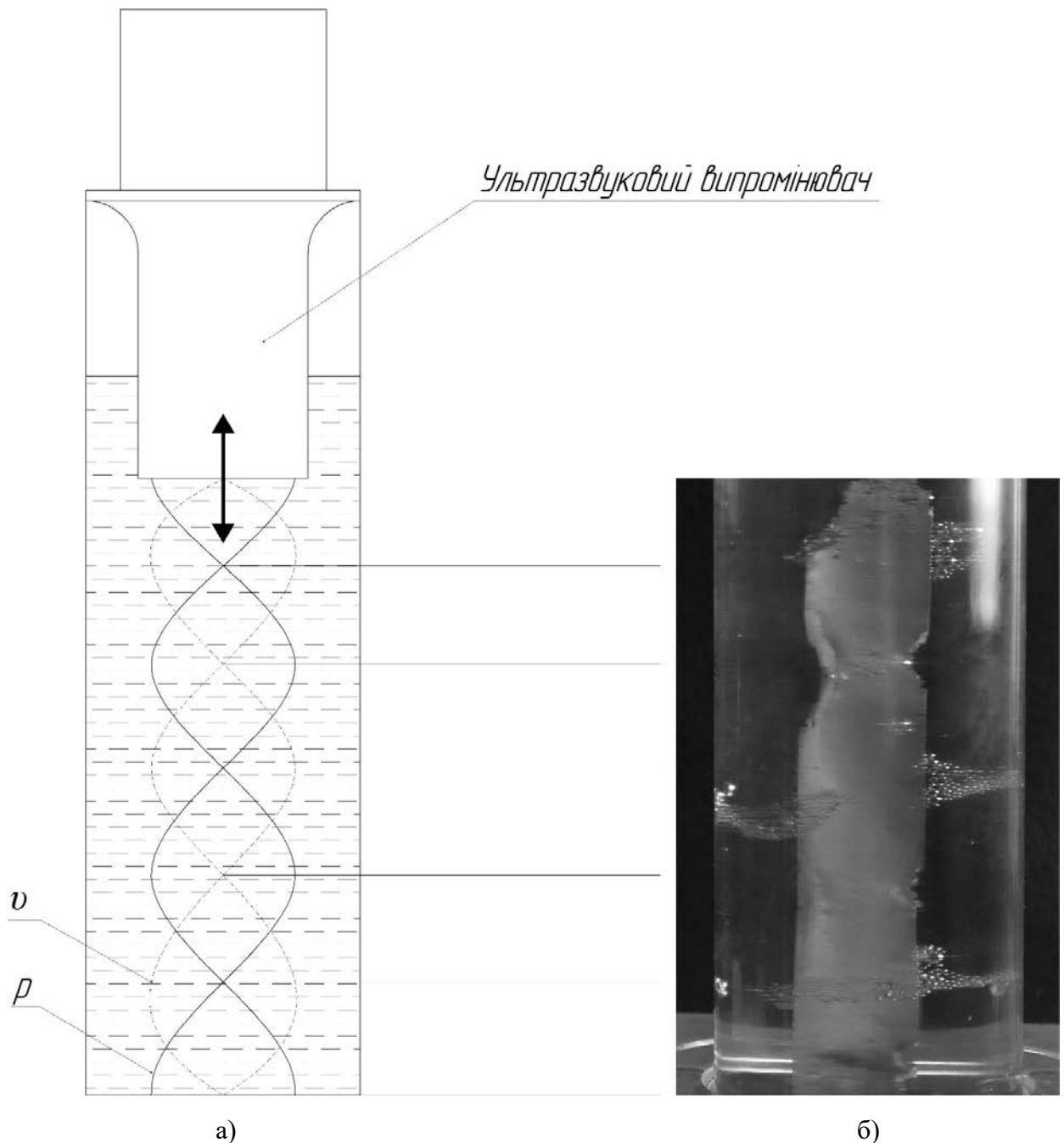


Рис. 2.2. Схема розміщення ультразвукового поля плоскої стоячої хвилі (а) і фотографія кавітаційної ерозії тестової алюмінієвої фольги в місцях, відповідних пучностям тиску (б)

звуковим тиском, не сплескуються. Саме такі прошарки бульбашок і спостерігаються візуально на експериментальних фотографіях звукового поля плоских стоячих хвиль (рис. 2.2а та рис. 2.2б). Тестова алюмінієва фольга, розміщена в кавітаційній камері нормально до випромінюючої поверхні ультразвукового перетворювача, показує відсутність кавітаційної ерозії фольги в перетинах, що відповідають вузлам тиску в стоячій хвилі (рис. 2.2б).

У пучностях хвилі тиску, де скупчуються бульбашки розміром менше $R_{рез}$, внаслідок чергування фаз стиснення і розрідження бульбашки, зробивши одне або кілька коливань і накопичивши при цьому енергію, сплескуються з утворенням ударних хвиль, які призводять до ерозійного руйнування тестової фольги (рис. 2.2б). Тестова фольга на рис. 2.2б додатково показує, що максимальна інтенсивність ерозійного руйнування спостерігається поблизу випромінюючої поверхні ультразвукового перетворювача. По мірі віддалення пучностей тиску від випромінюючої поверхні інтенсивність кавітаційної ерозії зменшується, що пояснюється втратами ультразвукової енергії при проходженні хвилі через двофазні кавітаційні прошарки, які поглинають і розсіюють ультразвукову енергію [92].

Зважена частка забруднювача рідини, опинившись біля кавітаційної бульбашки, зазнає або вплив потоку рідини від рухомої з великою швидкістю стінки бульбашки, або вплив ударної хвилі при сплескуванні бульбашки. Для випадку сферичної форми частинки забруднювача рівняння її руху в рідині може бути представлено у вигляді [93], [94]:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{опору}}{8} \rho d^2 (U - v)^2, \quad (2.4)$$

де m - маса частинки забруднювача; v - швидкість руху частинки; U - швидкість руху стінки кавітаційної бульбашки; $K_{сопр}$ - коефіцієнт лобового опору; d - діаметр частинки.

Згідно результатам роботи [95] характер зміни швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки має вигляд, представлений на рис. 2.3. З рисунку слідує, що стиснення бульбашки відбувається за законом, близьким до

експоненціального. Різке зростання швидкості починається з деякого критичного значення U_k . Досягнувши значення U_{max} при вже мінімальному розмірі

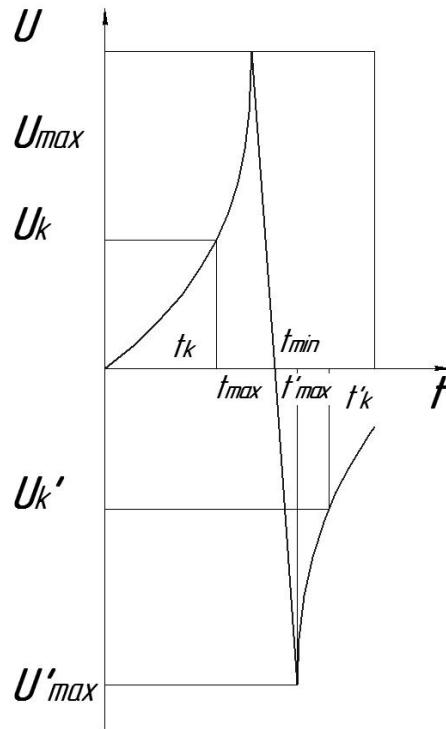


Рис. 2.3. Характер зміни швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки в фазі стиснення і в фазі розрідження

бульбашки, швидкість падає до 0. За даними роботи [96] характер зміни швидкості стінки кавітаційної бульбашки в фазі розрідження є симетричним відображенням фази стиснення.

Для випадку утворення кавітаційної бульбашки у в'язкій стисливій рідині при введенні в неї ультразвукової хвилі швидкість руху стінки бульбашки можна описати рівнянням Херрінга-Флінна [97]:

$$\begin{aligned}
 & R \left(1 - \frac{2U}{c_p} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4U}{3c_p} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \\
 & + \frac{1}{\rho} \left[p_0 - p_n - p_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu U}{R} \right. \\
 & \left. + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \frac{RU}{\rho c_p} \left(1 - \frac{U}{c_p} \right) \frac{dp(R)}{dR} = 0,
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

де p_n – тиск насиченого пару; $U = \frac{dR}{dt}$ - швидкість схлопування бульбашки;
 c_p - швидкість звуку в незбуреній рідині; $\omega = 2\pi f$ - колова швидкість коливань;
 γ - показник політропи.

Рішення рівняння (2.5) для випадку утворення кавітаційної бульбашки проведено при значеннях, представлених в табл. 2.1. Результати розрахунку представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 2.4.

Таблиця 2.1. Початкові значення, використані при моделюванні динаміки кавітаційної бульбашки

	$f, \text{кГц}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{М}^2}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{М}^3}$	$\sigma, 10^{-3} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$	$p_0, \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$	$p_n, \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$	$p_a, \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}$	$R_0, \text{м}$
Вода	22	20	0,001	1000	74	$4 \cdot 10^6$	2300	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Бензин	22	20	0,0005	750	21	$4 \cdot 10^6$	66000	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
АМГ-10	22	20	0,51	850	28,9	$4 \cdot 10^6$	-	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$

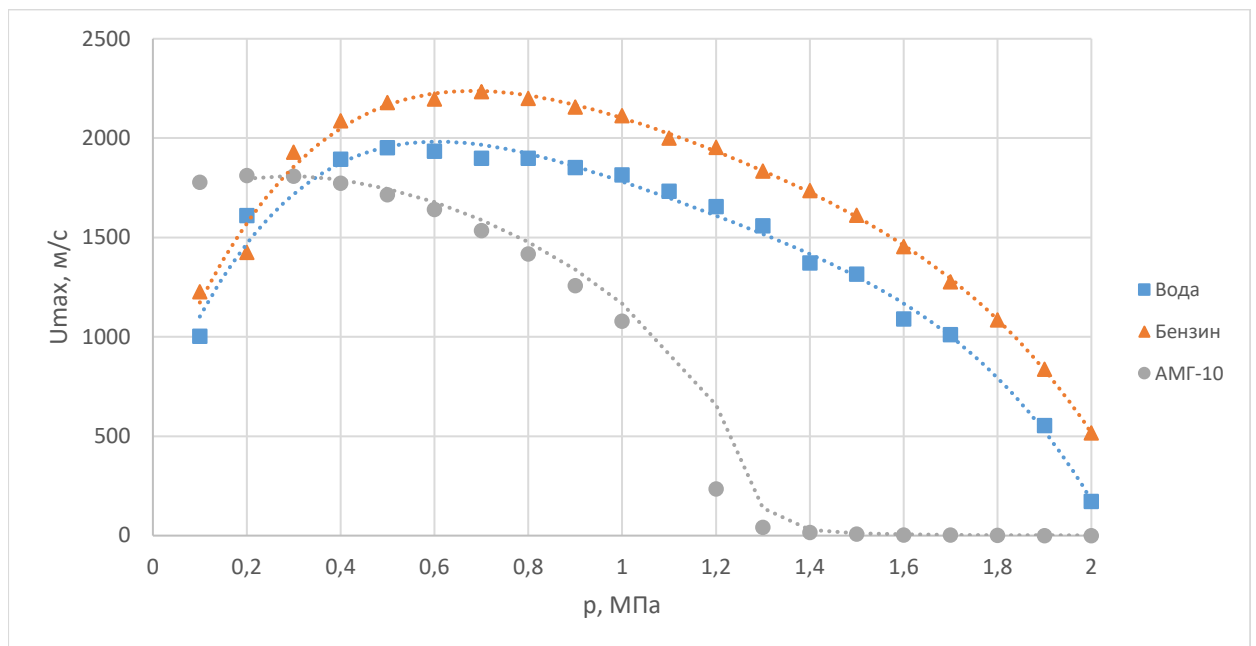


Рис. 2.4. Залежність швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки в фазі стиснення від статичного тиску в рідині

Вважаючи рух стінки кавітаційної бульбашки на ділянці $t_{max} - t_k$ рівноприскореним, рівняння (2.4) можна переписати у вигляді:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{опору} \rho d^2}{8m} (at - v)^2, \quad (2.6)$$

де $K_{сопр} = 0,8$; a - прискорення руху частинки забруднювача.

Інтегруючи отриманий вираз в межах від 0 до $t_{max} - t_k$, отримаємо [15]:

$$v = at + \sqrt{\frac{a}{A}} \cdot \frac{1 - e^{2\sqrt{aA}\tau}}{1 + e^{2\sqrt{aA}\tau}}, \quad (2.7)$$

де $\tau = t_{max} - t_k$; $A = \frac{\pi K_{опору} \rho d^2}{8m}$.

Результати розрахунку швидкості руху частинки забруднювача [98], що знаходиться біля стінки пульсуючої кавітаційної бульбашки, виконані за виразом (2.7), представлені у вигляді графіків на рис. 2.5. Отримані результати свідчать про можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

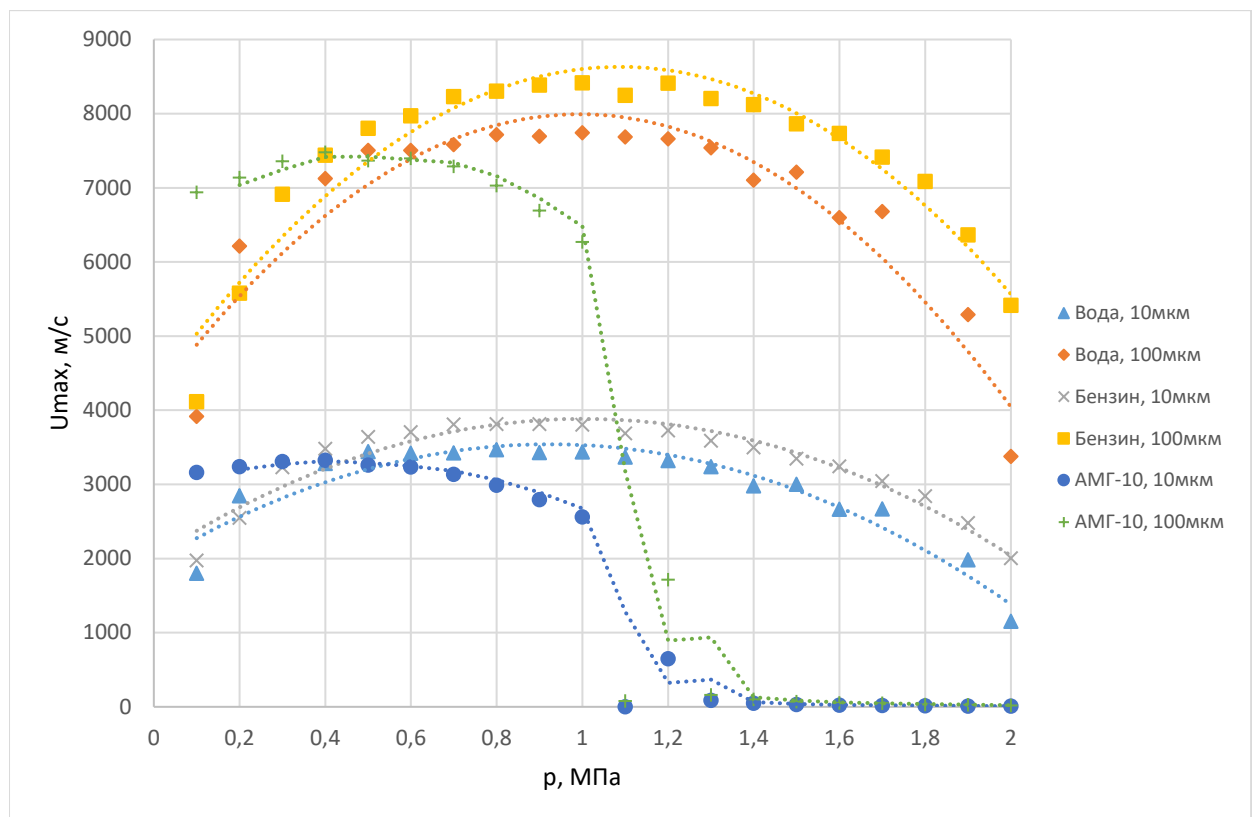


Рис. 2.5. Залежність швидкості руху частинок забруднювача різної маси і розмірів, що знаходяться в кавітаційному середовищі біля стінки бульбашки

За умови сталості швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки і її рівності середньоарифметичним значенням, можна визначити шлях, який частинка забруднювача пройде на ділянці $t_{max} - t_k$ з надзвуковою швидкістю, записавши рівняння (2.4) у вигляді [94]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left(U - \frac{dx}{dt} \right)^2. \quad (2.8)$$

Проінтегрувавши рівняння (2.8), отримаємо

$$x = \frac{1}{A} [UA\tau - \ln(1 + UA\tau)]. \quad (2.9)$$

Результати розрахунку величини переміщення частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки кавітаційної бульбашки, яка сплескується, в залежності від розмірів частинки і статичного тиску зведені в табл. [94].

Таблиця 2.2. Залежність величини переміщення частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки кавітаційної бульбашки, яка сплескується, в залежності від розмірів частинки і статичного тиску

Діаметр частинки, мкм	Статичний тиск, МПа	Переміщення в воді, мкм	Переміщення в бензині, мкм	Переміщення в АМГ-10, мкм
10	0,1	41,279702	74,60884	38,5649
	0,5	39,107835	54,17943	25,67424
	1	22,328168	34,98349	6,970632
	1,5	5,675779	14,38415	6,211486
	2	0,036039	0,641432	0,125832
100	0,1	6,026788	12,21081	5,565946
	0,5	5,657538	8,309672	3,480699
	1	2,969696	4,969105	0,821381
	1,5	0,658521	1,813939	0,725461
	2	0,003648	0,067504	0,012873

Аналіз отриманих розрахункових значень величини переміщення частинки забруднювача в кавітаційній області ультразвукового поля значно перевищує

розміри пор фільтрувальної перегородки, які в фільтрах тонкого очищення сягають 5 ... 20 мкм. Коливальні рухи частинок забруднювача не дозволяють їм проникнути крізь пори фільтра. Цей ефект іноді називають ефектом «п'яної» частинки. Зіштовхуючись між собою, частинки, що коливаються, коагулюють і осідають в шламосбірник фільтра. Проникнути через пори фільтра такі укрупнені частинки не можуть. Зіткнення подібних частинок забруднювача, що інтенсивно коливаються, з фільтрувальною перегородкою, сферичні ударні хвилі від бульбашок, що сплескуються, та високоенергетичні кумулятивні струмені, що виникають при сплескуванні кавітаційних бульбашок біля поверхні фільтрувальної перегородки, призводять, крім кавітаційної ерозії фільтрувальної перегородки, до збудження в ній ультразвукових коливань. Ці коливання істотно знижують поверхневе тертя при протіканні рідини крізь пори фільтрувальної перегородки, що призводить до підвищення продуктивності фільтра при інших рівних умовах. Знаходження фільтрувальної перегородки в кавітаційному середовищі забезпечує їй за рахунок супутніх кавітації ефектів практичну незасмічуваність [98].

2.2. Моделювання ударної взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні

Для розрахунку силової взаємодії рухомих частинок забруднювача з нерухомою поверхнею фільтроелементу, що деформується, доцільно використовувати методику, в основі якої лежить розв'язок контактної задачі Герца. Такий підхід може бути застосований для обчислення деформацій і напружень матеріалу фільтроелементу з врахуванням енергії удару частинок забруднювача [99].

Насправді, під час взаємодії твердої частинки забруднювача з нерухомою стінкою відбувається удар і напруження, які можуть бути значно більші ніж межа пружності. Вони концентруються на незначній поверхні та діють лише протягом

долі секунди. При розрахунку задачі Герца допускають, що при статичному навантаженні в тілах відбуваються лише пружні деформації.

Схему ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею нерухомої стінки по нормалі до поверхні можна представити згідно рис. 2.6. Тобто, частинка забруднювача рухається як жорстке тіло з дуже великою швидкістю $v > 1000 \text{ м/с}$, кут між напрямом руху і площиною поверхні φ твердої стінки, що деформується, складає майже 90° . Частинка діє на нерухому поверхню з силою F , яку можна представити у вигляді нормальної сили F_n та сили тертя F_t .

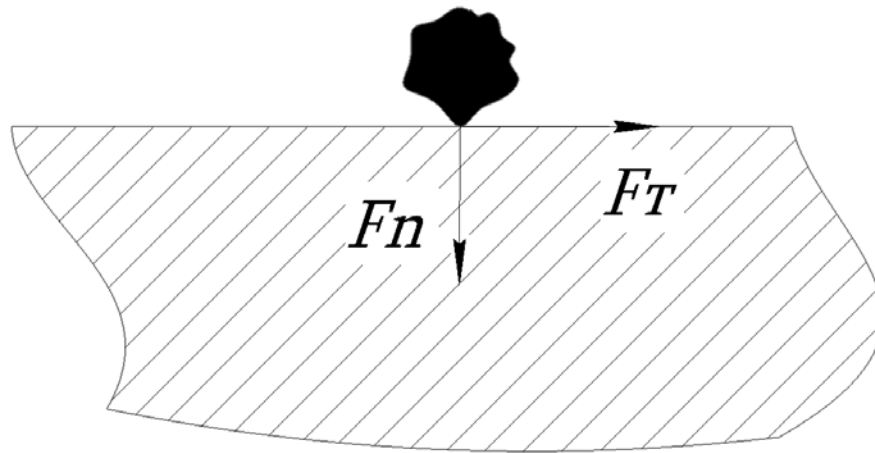


Рис. 2.6. Силова схема ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелемента

При збільшенні сили удару частинки забруднювача о поверхню фільтроелементу контактні напруження збільшуються і можуть досягати границі міцності. Згідно роботи [100], руйнування твердої стінки відбувається за умови, якщо напруження на контактній поверхні перевищує $K_d \sigma_c$, де σ_c -границя міцності матеріалу твердої стінки; K_d – коефіцієнт динамічності при ударному навантаженні.

Для розрахунку глибини занурення частинок забруднювача в нерухому поверхню фільтроелементу необхідно розв'язати систему рівнянь з теорії механіки суцільного середовища про вдавлювання жорсткої сфери у деформівний напівпростір. Через складність розрахунку ударних хвиль деформації задачу зводимо до розв'язання системи рівнянь для однієї з множини частинок [101].

В якості початкових умов приймалося, що в момент часу $t = t_0$ швидкість руху частинки забруднювача сферичної форми масою $m_{\text{ч}}$ радіусом $r_{\text{ч}}$ дорівнює V_0 , швидкість переміщення нерухомої поверхні тіла фільтроелементу масою $m_{\text{т}}$, яке обмежене напівпростором (рис. 2.6), дорівнює нулю. Відомі пружні характеристики матеріалів частинки забруднювача та фільтроелементу - модулі пружності E_1, E_2 та коефіцієнти Пуассона μ_1, μ_2 . Границя міцності матеріалу поверхні фільтроелементу $\sigma_{\text{в}}$ менша ніж границя міцності матеріалу частинки забруднювача. Взаємодія відбувається під кутом, близьким до нормалі нерухомої поверхні.

Виходячи з початкових умов, розрахунок змінних параметрів сили удару проводився для моментів часу, які визначалися послідовною зміною часу взаємодії на величину приросту Δt . Усі розрахунки продовжувалися до початку зворотного руху частинки забруднювача t_1 , а згодом до закінчення взаємодії t_2 . Час взаємодії визначався залежністю

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (2.10)$$

Припустимо, що ударна взаємодія частинки забруднювача та матеріалу нерухомої поверхні фільтроелементу відбувається в момент часу t_0 . Також в цей момент будь-які види напруженого стану в обох тілах відсутні. Через приріст часу Δt , тобто в момент часу $t_1 = t_0 + \Delta t$ в контактуючих тілах утворюються просторово локалізовані зони напружено-деформованого стану обсягами δ_1 та δ_2 , обумовленими сферами з радіусами $r = v_{\text{ув}} \cdot t_1$. Це дає змогу розрахувати маси деформованого об'єму матеріалу в частинці та в тілі фільтроелементу за формулами:

$$\begin{aligned} m_{\text{д}} &= \rho_{\text{т}} \cdot \pi (v_{\text{ув}} \cdot t)^3, \text{ при } m_{\text{д}} < m_{\text{т}}; \\ m_{\text{д}} &= m_{\text{т}}, \text{ при } m_{\text{д}} > m_{\text{т}}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де $\rho_{\text{т}}$ - щільність матеріалу фільтроелементу, кг/м³; $v_{\text{ув}}$ – швидкість поширення ударної хвилі, м/с; $m_{\text{д}}$ – маса деформованого тіла, кг.

Саме закон збереження енергії став основою побудови математичної моделі. Передбачається, що кінетична енергія руху частинки забруднювача при контакті з нерухомою поверхнею фільтроелементу переходить в енергію пружної деформації його матеріалу, тертя на контактних поверхнях та енергію ударних хвиль, що поширюються по частинці забруднювача та нерухомій поверхні. Тому доцільно буде записати:

$$E_{к1} = E_{y1} + E_{y2} + E_{тр} + E_{п} + E_{в1} + E_{в2}, \quad (2.12)$$

де $E_{к1}$ - кінетична енергія частинки забруднювача; E_{y1}, E_{y2} - енергія пружних деформацій частинки забруднювача та нерухомої поверхні; $E_{тр}, E_{п}$ - втрати енергії на тертя, пластичні деформації та інші види необоротних втрат; $E_{в1}, E_{в2}$ - хвильова енергія частинки забруднювача і поверхні фільтроелементу, яка визначається об'ємами, що охоплені ударною хвилею.

Співвідношення між енергією хвилі деформації та пружною деформацією раніше досліджувалось в роботі [102]. Результати показують, що в кожній окремій хвилі енергія пружних деформацій дорівнює кінетичної енергії хвилі, але при накладенні декількох хвиль стиснення і розтягування цей баланс порушується, оскільки по-різному підсумовується енергія. В той час, коли хвиля відбивається від вільної поверхні тіла, хвиля стиснення додається до відбитої хвилі і нерухома поверхня звільняється від енергії деформацій. Як результат, кінетична енергія частинок подвоюється. Однак, при відбитті хвилі деформації від жорсткої, локально zdeформованої стінки, все відбувається навпаки, тобто енергія деформацій подвоюється за рахунок розвантаження частинок тіла від кінетичної енергії. Такі процеси, а саме, повне розвантаження і подвоєння деформацій, можуть відбуватися тільки для тіл простої форми, наприклад, стрижня. Якщо тіла складної форми, то збільшення енергії пружної деформації за рахунок енергії хвилі відбувається лише частково. Підсумувавши все вище зазначене, слід підкреслити, що величина поверненої хвильової енергії пропорційна енергії пружної деформації.

Для подальших розрахунків даної моделі будемо враховувати тільки часткове повернення первинної хвилі деформації стиснення і розтягування. Всі інші хвилі, які формуються в тілах в результаті проходження первинних хвиль, враховувати не будемо. Рівняння передачі енергії в цьому випадку можемо записати у вигляді:

$$E_{к1}(1 - k_{в}\eta) = E_{тр} + E_{п2}, \quad (2.13)$$

де $k_{в}$ - коефіцієнт збільшення пружної деформації за рахунок енергії хвилі, який змінюється у межах від 1,5 до 2,0; η - коефіцієнт передачі кінетичної енергії.

$$\eta = \frac{E_{упр}}{E_{к1}}, \quad (2.14)$$

де $E_{упр}$ - енергія пружної деформації частинки забруднювача та фільтроелементу, Дж.

Щоб визначити поле напружень, ударно взаємодіючих тіл, потрібно записати закон розподілу енергії в процесі удару. Для визначення співвідношення між кількістю енергії, що витрачається на формування пружних (оборотних) деформацій у взаємодіючих тілах, та кількістю енергії, яка необхідна для формування пластичних (необоротних) деформацій, використовувались закони збереження енергії імпульсу. Тому, ударну взаємодію можемо описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{m_{ч}v^2}{2} &= \frac{2}{\eta} \left(\frac{m_{ч}u_1^2}{2} + \frac{m_{д}u_1^2}{2} \right), \\ m_{ч}(\vec{v} - \vec{u}_1) &= \vec{F}_{ср} \cdot \Delta t, \\ -m_{д}\vec{u}_2 &= \vec{F}_{ср} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (2.15)$$

де $m_{ч}, m_{д}$ – маса частинки забруднювача та деформованого тіла, охоплених хвилями деформації в момент часу t , кг; v - швидкість частинки забруднювача до удару, м/с; u_1, u_2 - швидкості мас $m_{ч}$ і $m_{д}$ після удару, м/с; $F_{ср}$ - середнє зусилля, яке діє в інтервалі часу Δt , Н.

Дана система рівнянь має такі невідомі параметри, як: $\eta, u_1, u_2, F_{ср}$. Для

визначення коефіцієнта передачі кінетичної енергії можна скористатися наступним виразом:

$$\eta = \frac{2F_{y\text{cp}} \cdot \Delta h_y}{m_{\text{ч}} v^2}, \quad (2.16)$$

де, $F_{y\text{cp}}$ - середнє зусилля пружних деформацій в інтервалі часу Δt , Н;
 Δh_y - приріст пружної деформації за час Δt , м.

Середнє зусилля за час Δt деформації фільтроелементу визначається залежністю:

$$F_{y\text{cp}} = \frac{F_y(h_y - \Delta h_y) + F_y(h_y)}{2}, \quad (2.17)$$

де h_y - пружна деформація, м.

В рамках одного кроку за час Δt визначаються всі параметри, що входять в систему рівнянь (2.15) в наступному порядку.

Визначаються значення сили пружного взаємодії в контактї. Значення F_y розраховується при кожному значенні t_i . Кожен раз уточнюється значення коефіцієнту відновлення. У формулу підставляється значення, отримане на попередньому кроці по часу. В якості початкового значення при розрахунку можна прийняти $\eta_1 = 1$.

Із системи рівнянь (2.15) далі при кожному значенні часу t_i знаходяться швидкості частинки забруднювача та нерухомої поверхні після удару:

$$\begin{aligned} u_{2i} &= \frac{F_{y\text{cp}} \cdot \Delta t}{m_{\text{ді}}}; \\ u_{1i} &= \frac{F_{y\text{cp}} \cdot \Delta t}{m_{\text{чі}}}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для визначення сили за період часу Δt удару сполучених тіл використовувалася теорія контактної взаємодії Герца. При розрахунках поля напружень, що змінюються з плином часу, необхідно використовувати рівняння, яке встановлює зв'язок між силою $F_{y\text{cp}}(\Delta t)$, що діє на поверхнях контакту двох тіл, які піддаються взаємному стисненню, та загальною деформацією $\Delta h(\Delta t)$.

Розрахунок пружних деформацій в процесі ударної взаємодії тіл крім рівнянь Герца враховує закони передачі кінетичної енергії і імпульсу. При цьому, при рішенні система рівнянь ((2.15),(2.17)) врахована умова

$$F_{cp} = F_{ycp}(\Delta h). \quad (2.19)$$

Рішення системи рівнянь відносно невідомих параметрів дозволяє визначити величину приросту пружної деформації Δh_y за період часу Δt . Виходячи з формули Герца, значення пружної деформації обчислювалося за формулою:

$$h_y = {}^{1/1,5} \sqrt{\frac{F_{ycp}}{k_{\Pi}}}, \quad (2.20)$$

де k_{Π} - коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$k_{\Pi} = 1,33\sqrt{r} \frac{E_1 E_2}{(1-\nu_1^2)E_2 + (1-\nu_2^2)E_1}. \quad (2.21)$$

Загальна пружна деформація за час удару t визначалася підсумовуванням приростів:

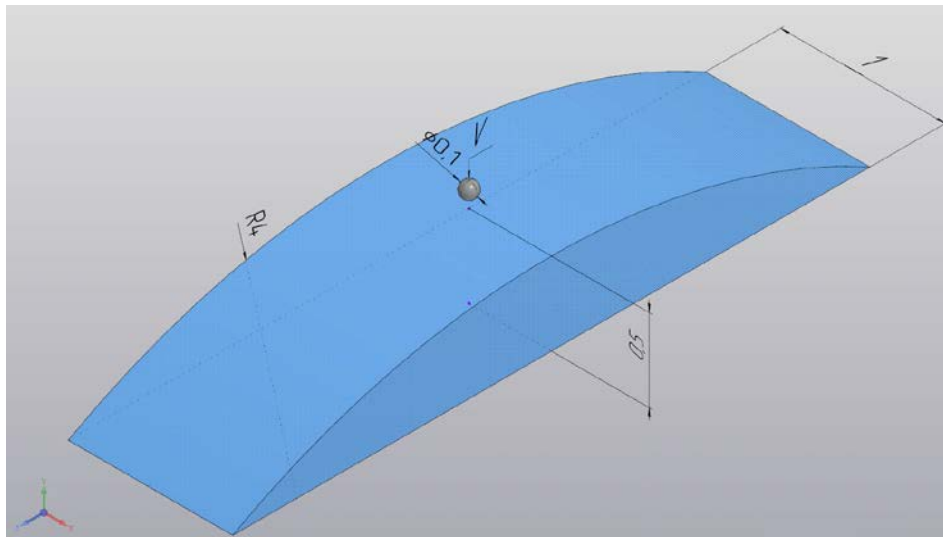
$$h_y = \sum_{i=1}^n \Delta h_{y_i} \quad (2.22)$$

Опираючись на теоретичну модель, проведено математичне моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні з використанням проекційно-сіткових методів скінченних елементів та скінченних різниць, які реалізовані в програмному забезпеченні ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3 [103].

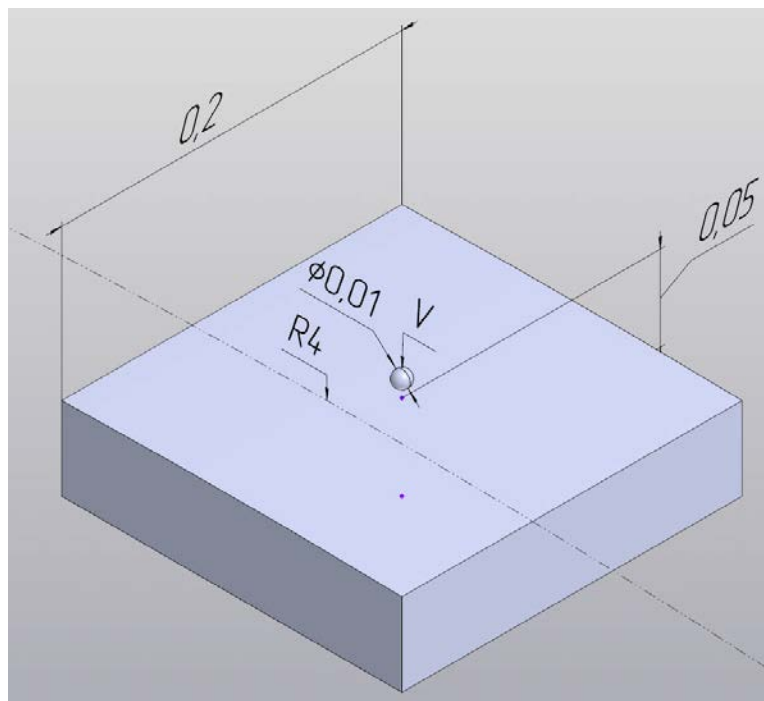
У якості матеріалу для виготовлення фільтроелементу обрано зразки зі сталі 12X18H10T та фторопласту Ф4 з ізотропними фізико-механічними характеристиками, які отримані з літературних джерел [104]–[106]. Границя статичної міцності матеріалу заготовки зі сталі 12X18H10T дорівнює 490 МПа, а для фторопласту Ф4 – 32 МПа. Для моделі забруднювача використовувались частинки іржі (Fe_2O_3) сферичної форми діаметром 10 мкм та 100 мкм. Початкова швидкість жорстких частинок забруднювача вибрана як мінімальна швидкість, величини якої отримані в роботі [107] при моделюванні даних процесів. Для

розглянутих в дослідженні чотирьох розрахункових схем з різними типами матеріалів фільтроелемента швидкість двох видів частинок іржі дорівнювала 2000 м/с.

Дискретизація об'ємів контактуючих тіл для проведення обчислень деформацій та напружень фільтроелемента виконувалась тетраїдальними скінченними елементами в кількості 431 089 для моделей з частинками



а)

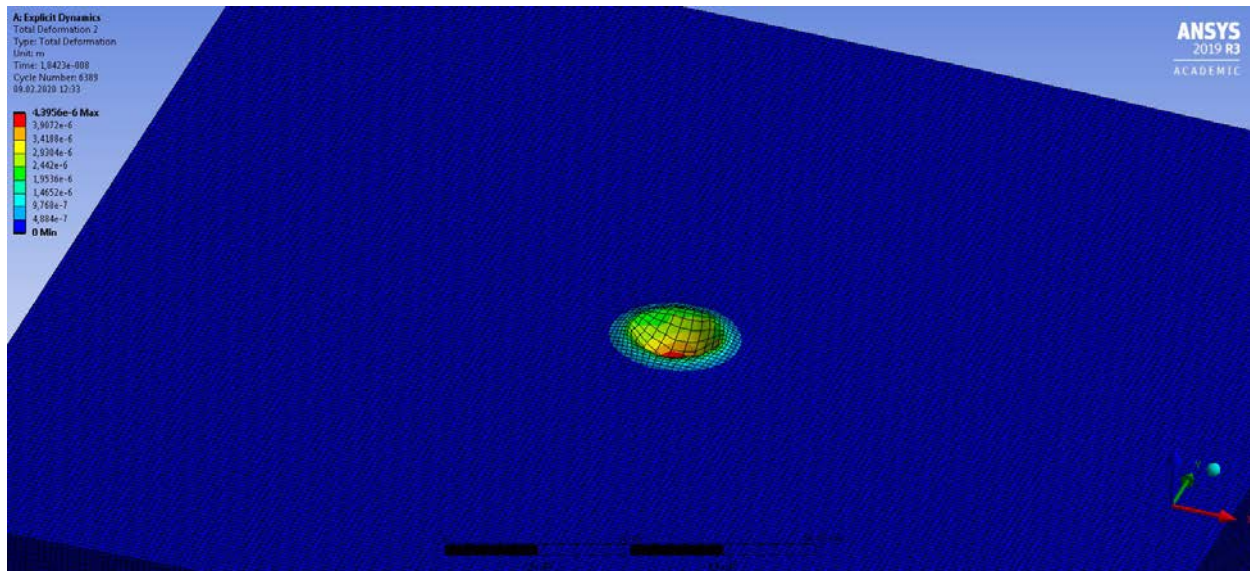


б)

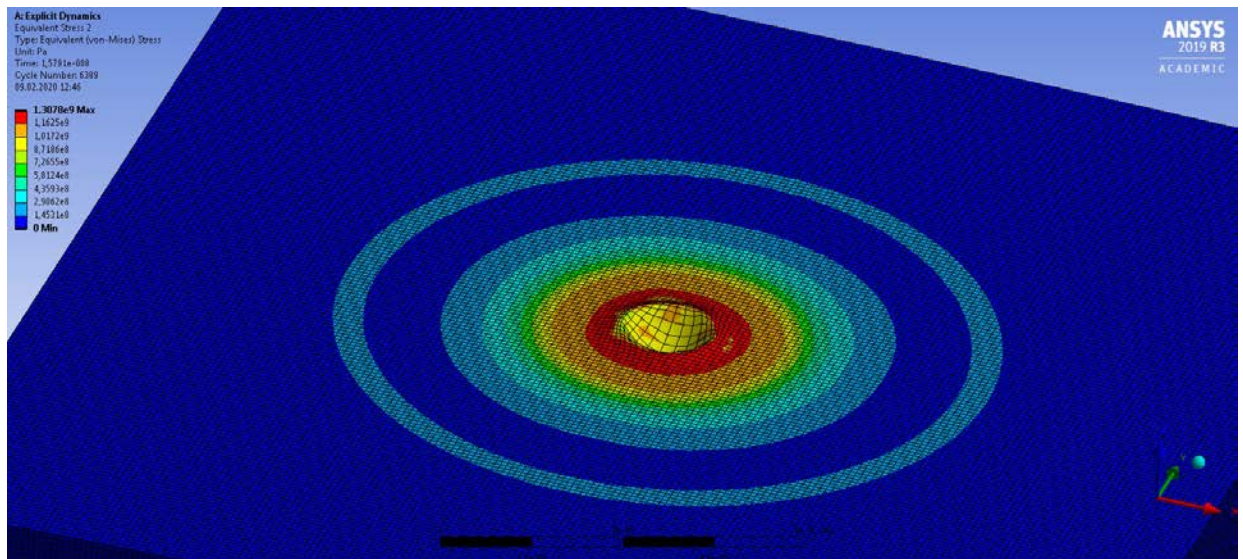
Рис. 2.7. Імітаційні моделі для дослідження ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелемента (а - для забруднювача діаметром 100 мкм; б - для забруднювача діаметром 10 мкм.)

забруднювача 100 мкм (рис. 2.7б) та відповідно – 396 863 для моделей з частинками забруднювача 10 мкм (рис. 2.7а).

Перший варіант моделювання проведено для ударної взаємодії забруднювача діаметром 10 мкм з фільтроелементом зі сталі 12Х18Н10Т при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні. В результаті чисельних



а)

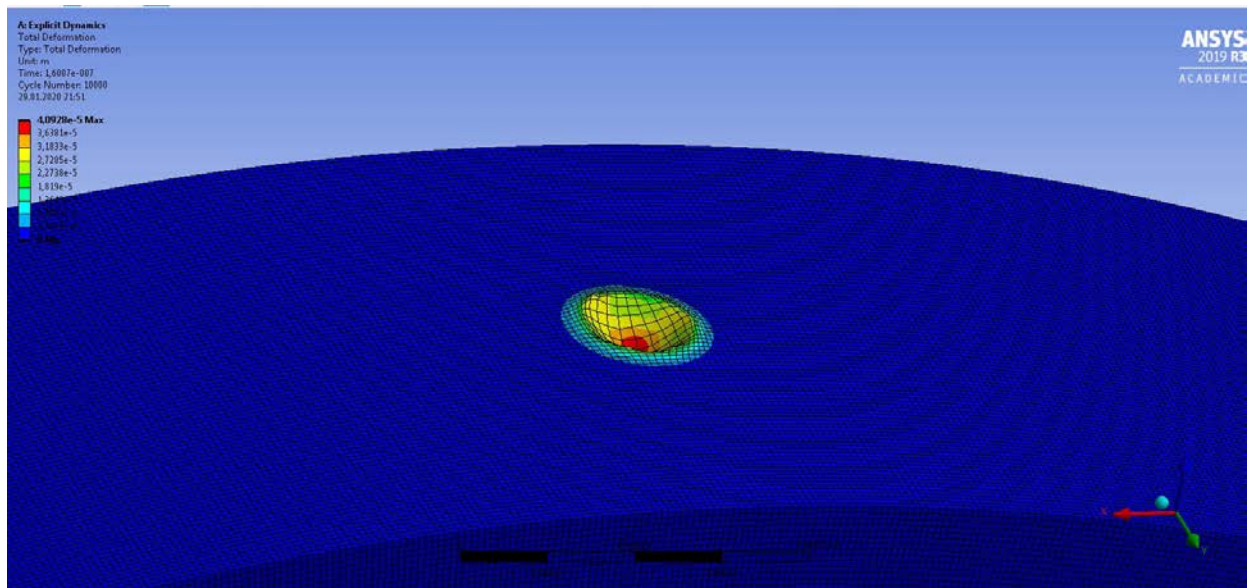


б)

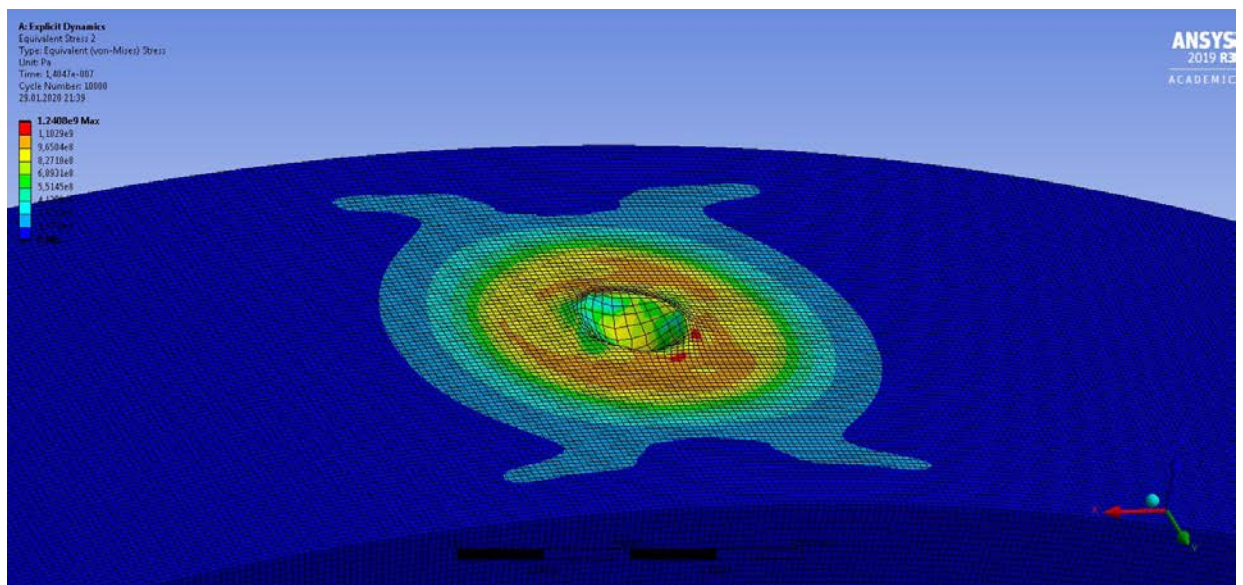
Рис. 2.8. Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

розрахунків отримано величини максимальної деформації поверхні фільтроелемента, яка дорівнює $4.3956 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 2.8а) та максимального

еквівалентного за Мізесом напруження – 1309 МПа. Зона ймовірного руйнування даного матеріалу складає 5,6 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.8б).



а)

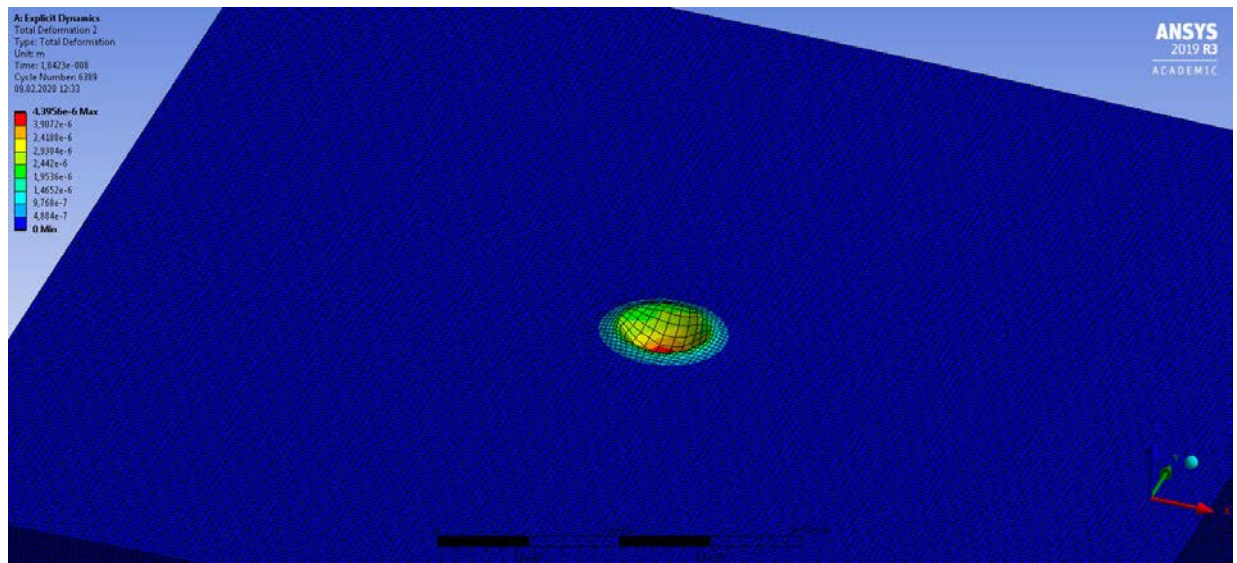


б)

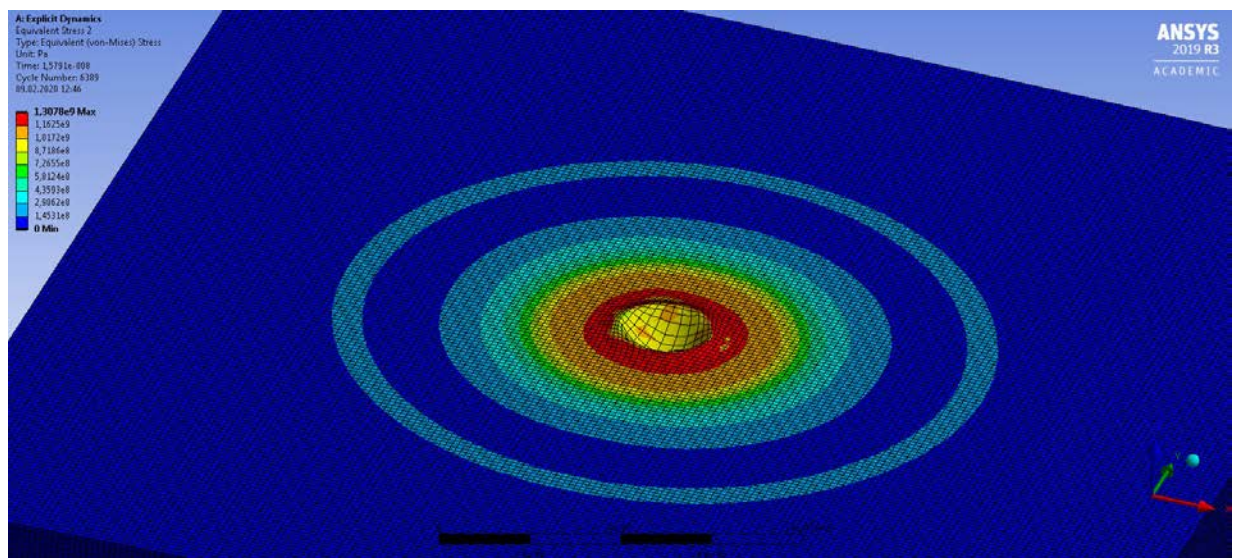
Рис. 2.9. Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Наступним проводилося моделювання взаємодії частинки забруднювача діаметром 100 мкм з фільтроелементом зі сталі 12Х18Н10Т. В цьому випадку максимальна повна деформація дорівнює $4.0928e^{-5}$ м (рис. 2.9а), а максимальне

еквівалентне за Мізесом напруження досягає 1241 МПа. Зона ймовірного руйнування 5,2 діаметрів частинки забруднювача. (рис. 2.96).



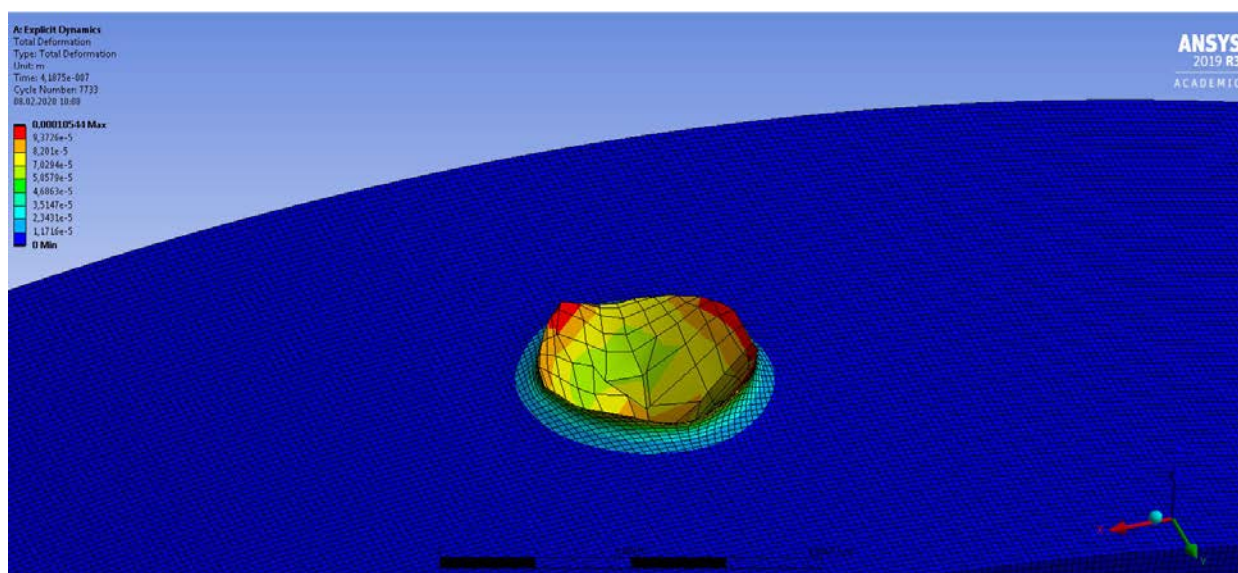
а)



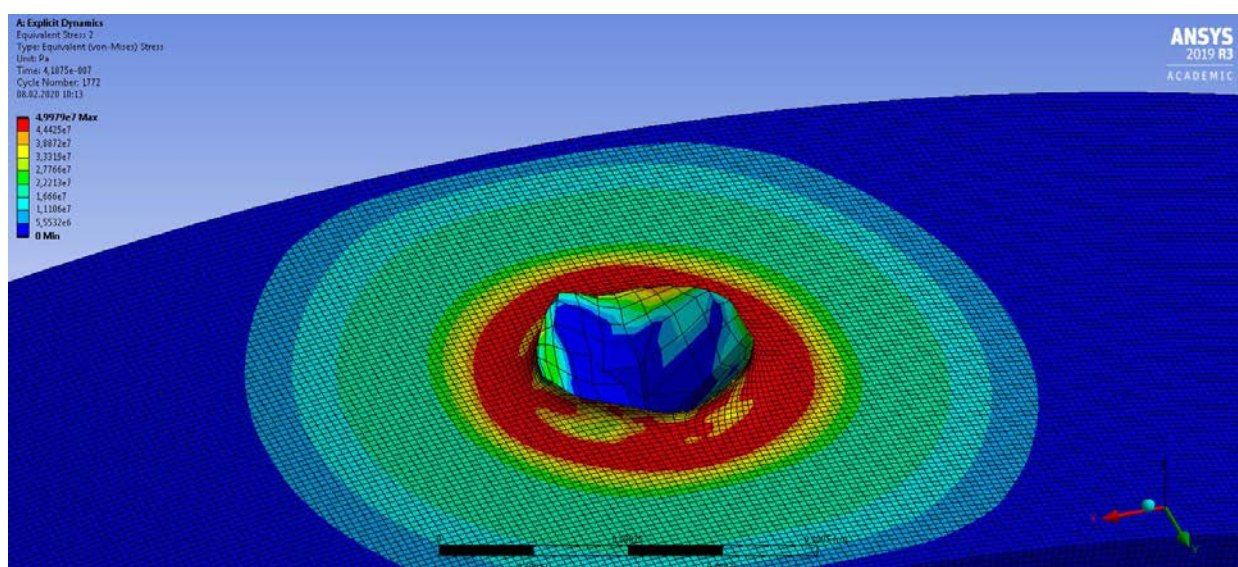
б)

Рис. 2.10. Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Після цього проводилось моделювання взаємодії фторопласту Ф4 з частинкою забруднювача діаметром 10 мкм. Як результат, отримано величини максимальної деформації – $4.3956 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 2.10а) та максимального за Мізесом еквівалентного напруження – 1308 МПа. Зона ймовірного руйнування становить 6,5 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.10б).



а)



б)

Рис. 2.11. Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Для порівняння виконали моделювання взаємодії частинки забруднювача діаметром 100 мкм з фторопласту Ф4. В такому варіанті отримали максимальну повну деформацію 1.0544×10^{-5} м (рис. 2.11а) та максимальне еквівалентне за Мізесом напруження, яке досягає 50 МПа. Зона ймовірного руйнування складає 6,2 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.11б).

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що напруження, які виникають під час зіткнення частинки невеликих розмірів при надзвучових

швидкостях з нерухомою поверхнею, перевищують межі міцності досліджених конструкційних матеріалів. Зіткнення таких частинок з фільтрувальною перегородкою викликає ерозійне руйнування матеріалу фільтроелементу, що потребує ретельного підбору конструкційних матеріалів для виготовлення фільтрів, які працюють в ультразвуковому кавітаційному середовищі.

В результаті моделювання встановлено, що сталь 12Х18Н10Т в два рази більш стійка до ерозійного руйнування, ніж фторопласт Ф4. Для підбору кавітаційно стійкого матеріалу для виготовлення фільтроелементів потрібно збільшити кількість досліджуваних модельних матеріалів та підтвердити результати моделювання натурним експериментом.

Розділ 3. Розробка технічного рішення та методики розрахунку ультравукових кавітаційних фільтрів

3.1 Розробка технічного рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення

Аналіз відомих з літературних джерел технічних рішень ультразвукових випромінювачів дозволив запропонувати перспективну схему УЗФ (рис. 3.1, рис. 3.2, рис. 3.3) [70].

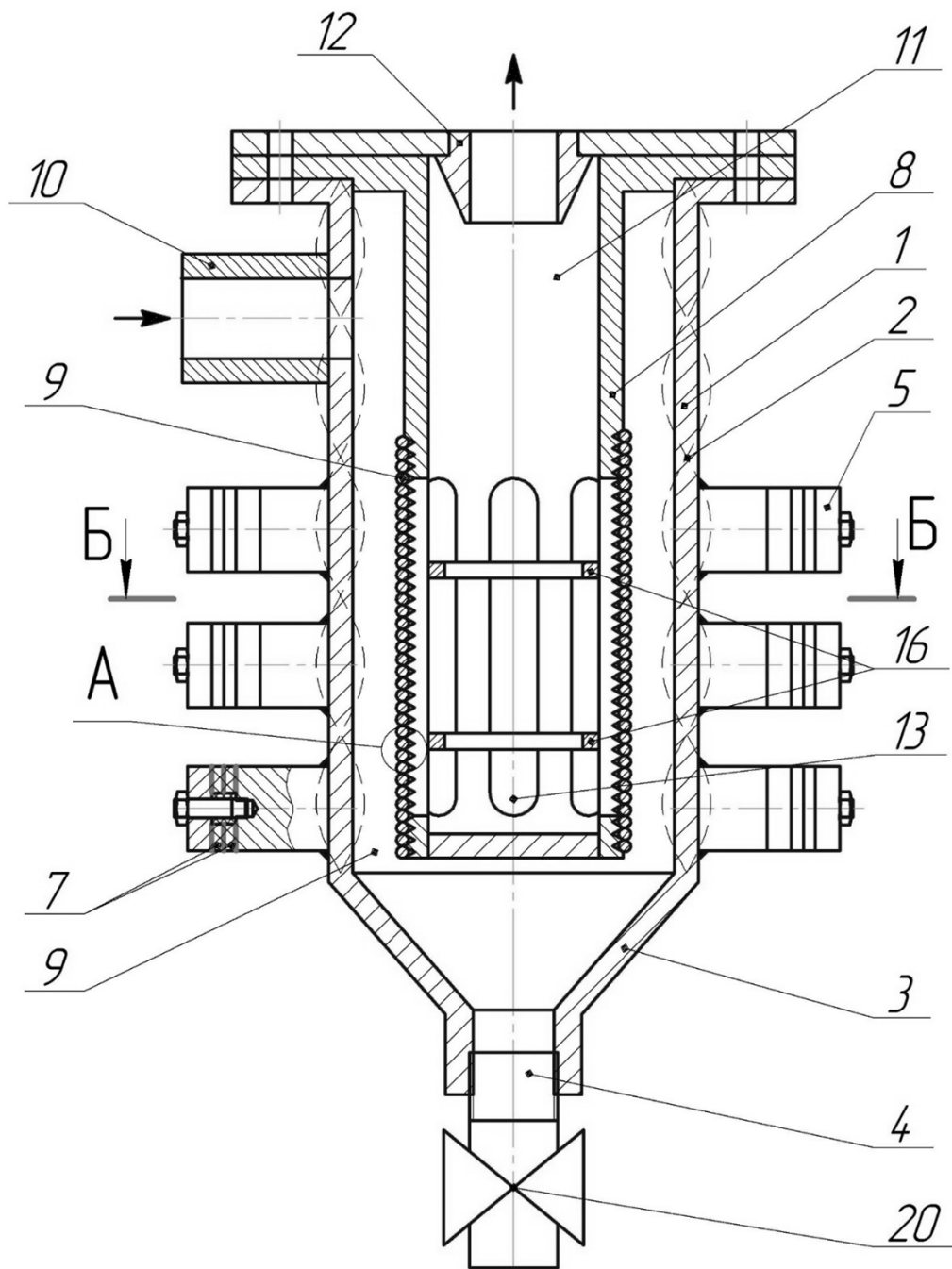


Рис. 3.1. Схема УЗФ з резонансним корпусом

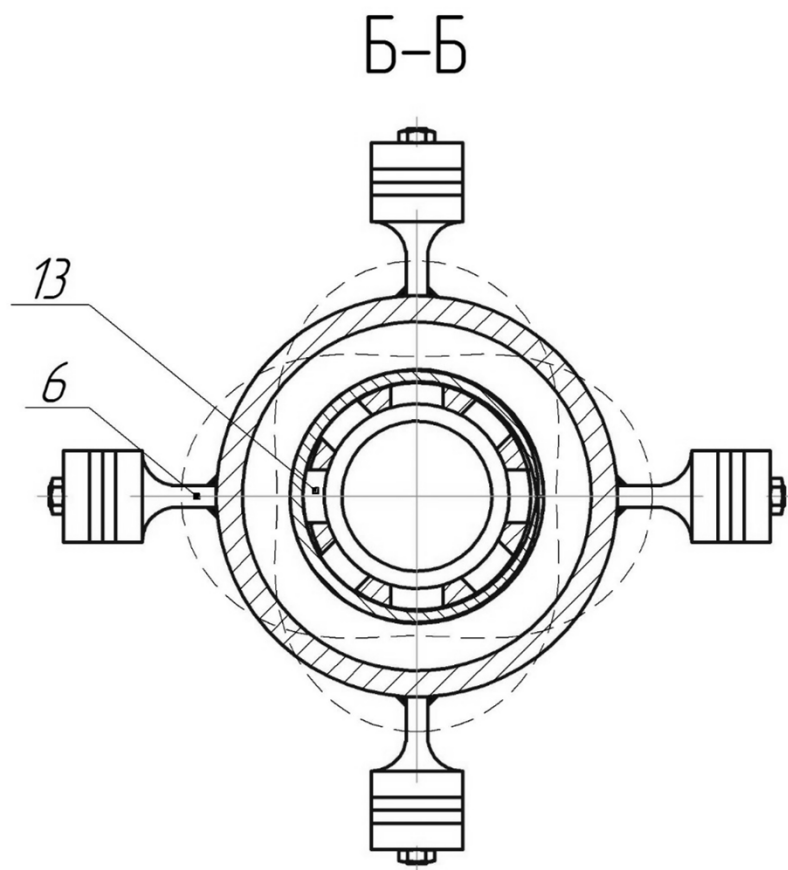


Рис. 3.2. Перетин по лінії Б-Б

Запропонована конструкція складається з резонансної трубчастої кавітаційної камери, виконаної у вигляді суцільної труби 1 (рис. 3.1), акустично розв'язаної з місцями кріплення та під'єднання. Акустичне розв'язування реалізовано за рахунок кріплення суцільної труби 1 в вузлових точках поздовжньо-згинальної хвилі деформації 2, що встановлюється по довжині труби. В нижній частині труба 1 з'єднана з конусоподібним шламовібирником 3, який має патрубок 4 для відведення шламу. На зовнішній твірній поверхні труби 1 вздовж твірної лінії посекційно встановлені складені ультразвукові перетворювачі 5 з ножевидними трансформаторами коливальної швидкості 6 (рис. 3.2) та п'єзокерамічними кільцями 7, які електрично підключені до генератора електричних коливань системи автоматичного керування (на схемі умовно не показана) таким чином, що в трубі збуджуються резонансні радіальні або радіально-згинальні та поздовжньо-згинальні коливання, а місце розміщення

ультразвукових перетворювачів 5 в межах секцій та відстань між секціями вздовж труби регламентовані параметрами резонансних коливань труби 1, тобто вони розміщені в пучностях поздовжньо-згинальної хвилі деформації 2, що встановлюється по довжині труби 1. В середині кавітаційної камери вздовж осі розміщений трубчастий циліндричний фільтрувальний елемент 8, що ділить кавітаційну камеру на частину 9 з засміченою рідиною, що має патрубок 10 для підведення рідини, та частину 11 з очищеною рідиною, яка має патрубок 12 для відведення рідини, причому камера 11 з очищеною рідиною утворена всередині

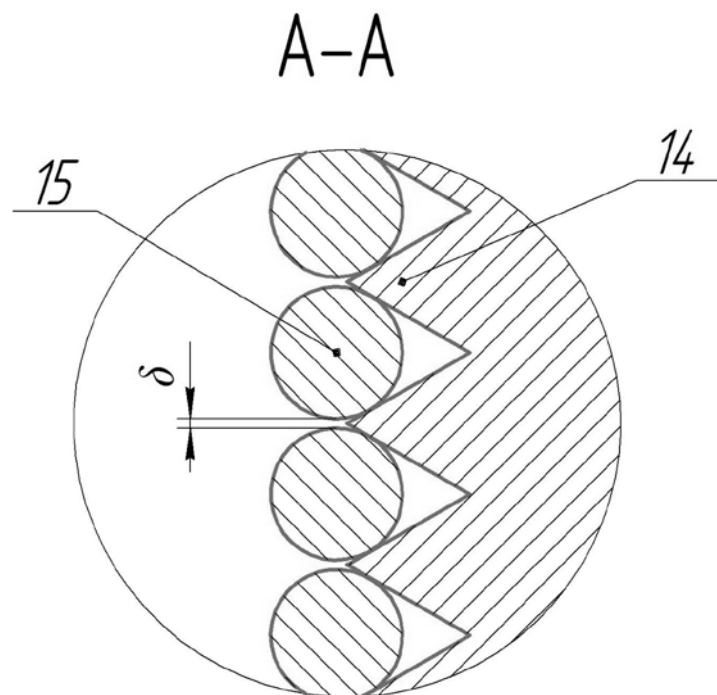


Рис. 3.3 Збільшений фрагмент А-А зі схеми УЗФ

фільтрувального елементу. Трубчастий циліндричний фільтрувальний елемент 8, як варіант, може бути виконано у вигляді труби з наскрізними поздовжніми вікнами 13 (рис. 3.1, рис. 3.2), на зовнішній поверхні якої в області поздовжніх вікон 13 виконана різьбова канавка 14 (рис. 3.3), в яку укладена та закріплена проволока 15 (рис. 3.3) з кавітаційно стійкого матеріалу з утворенням фільтрувального зазору між витками проволоки [70].

Необхідна жорсткість конструкції трубчастого фільтрувального елементу 8 з наскрізними поздовжніми вікнами 13 забезпечена розпірними кільцями 16,

що встановлені всередині труби фільтроелементу в зоні поздовжніх вікон 13. Труба 1 кавітаційної камери може бути виконана у вигляді окремих, акустично розв'язаних та ущільнених ущільненнями кілець, на кожному з яких розміщені окремі секції ультразвукових перетворювачів, а товщина кілець вибрана меншою за половину довжини хвилі поздовжньо-згинальних коливань. При цьому кільця стягнуті між собою поздовжніми шпильками. На патрубку 4 для відведення фільтрату з конусоподібного шламовісника 3 встановлений клапан 20 автоматичного видалення шламу, під'єднаний до системи автоматичного керування [70].

УЗФ, що пропонується [70], працює наступним чином. Через фільтр за допомогою вхідного 10 та вихідного 12 патрубків прокачується під тиском рідина, яка потребує очищення. При подачі високочастотної напруги від електричного генератора коливань системи автоматичного керування на ультразвукові перетворювачі 5 в останніх збуджуються поздовжні резонансні пружні механічні коливання, які передаються циліндричній трубі 1 або окремим циліндричним кільцям. Ультразвукові трансформатори коливальної швидкості 6 забезпечують збільшення амплітуди коливань до необхідного рівня. Ножевидна форма трансформаторів коливальної швидкості та їх розташування вздовж твірної лінії труби забезпечує мінімальний вплив кріплення трансформаторів на форму коливань труби 1 або окремих кілець. Обрані геометричні розміри труби 1 або окремих кілець забезпечують їх збудження на резонансній частоті радіальних або радіально-згинальних та поздовжньо-згинальних коливань. Резонансні коливання кавітаційної камери призводять до виникнення в рідині ефекту кавітації. При сплескуванні кавітаційних бульбашок утворюються руйнівні ударні хвилі, енергоємні кумулятивні струмені [84], високий тиск (до 10^3 МПа) та температура (до 1000°C) в мікрооб'ємах рідини, що забезпечує постійне очищення фільтрувального елементу, загибель мікроорганізмів, тобто знезараження рідини та отримання стійких емульсій. Коливання частинок забруднювача в ультразвукових хвилях призводить до їх злипання та

осаджування в шламосбірник. Через певний час по команді системи автоматичного керування за допомогою клапана 20 відбувається видалення шламу із шламосбірника [70].

3.2 Методика розрахунку циліндричної ультразвукової кавітаційної камери фільтра з ефектом самоочищення

Кавітаційна камера фільтра являє собою доволі складну резонансну систему, яка дозволяє створити всередині її ємності розвинене кавітаційне

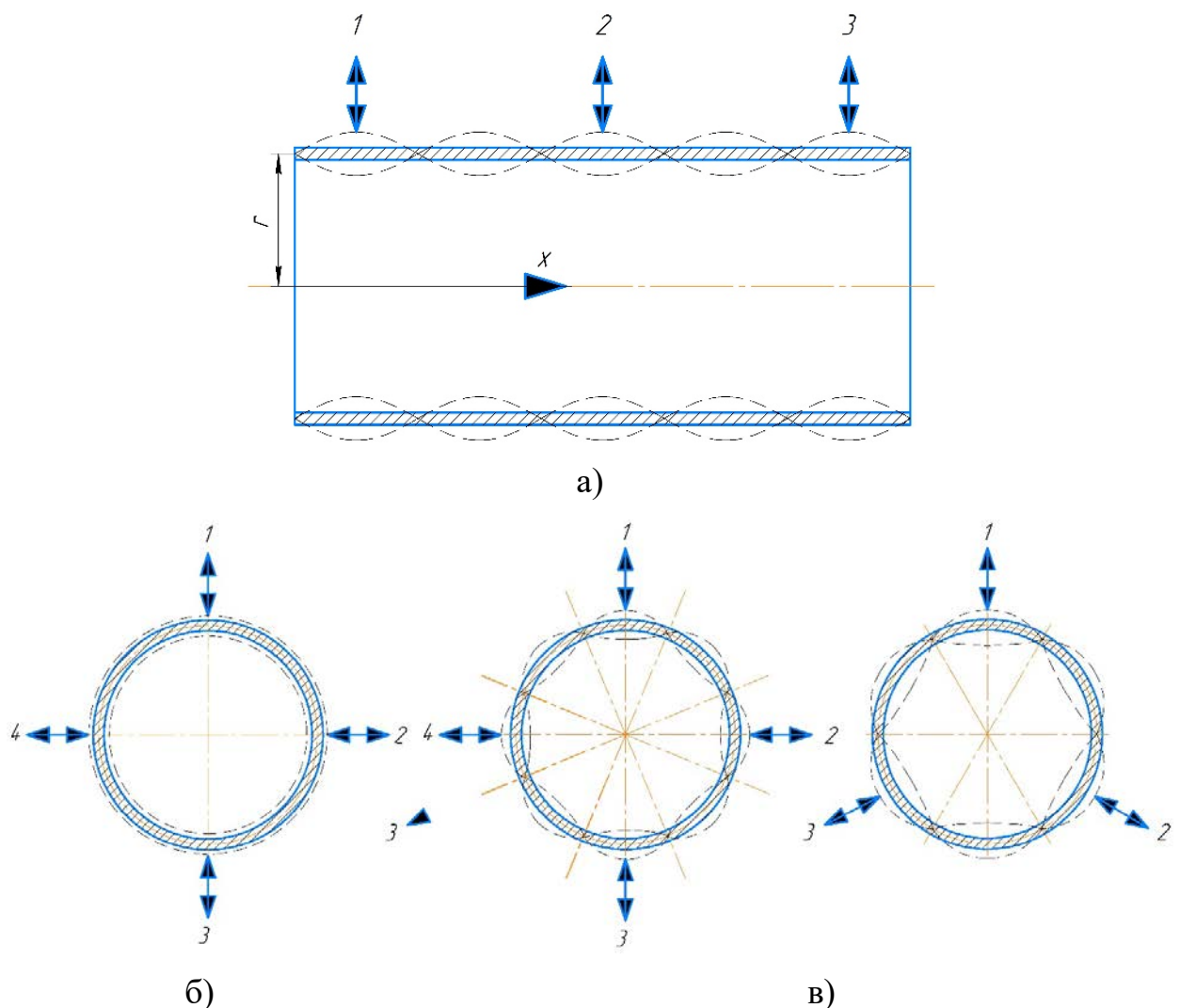


Рис. 3.4. Розрахункова акустична схема кавітаційної камери фільтра

(а – схема збудження згинальних коливань по довжині корпусу; б – схема збудження циліндричного корпусу на радіальній моді коливань; в - схеми збудження радіально – згинальних коливань з парною та непарною кількістю n 'єзоелектричних приводів – випромінювачів, що збуджуються синхронно)

середовище. Для ефективної роботи камери необхідно узгодити резонансні коливання, синхронно працюючих, п'єзоелектричних приводів-випромінювачів поздовжніх коливань, що встановлюються ззовні здовж твірної лінії циліндричної поверхні камери, з поздовжніми резонансними коливаннями по довжині циліндричної камери та резонансними радіально – згинальними коливаннями по діаметру камери (рис. 3.4).

В разі збудження радіальної моди коливань за рахунок внутрішньої циліндричної поверхні камери відбувається фокусування ультразвукових коливань здовж осі камери. Це призводить до суттєвого підвищення інтенсивності ультразвукових коливань здовж осі камери (рис. 3.5) [52]. Таке ультразвукове поле з інтенсивністю більше 100 Вт/см^2 здатне ефективно інактивувати шкідливі для здоров'я людини мікроорганізми, але на внутрішній поверхні камери інтенсивність буде незначною, недостатньою для збудження ультразвукової кавітації поблизу внутрішньої поверхні.

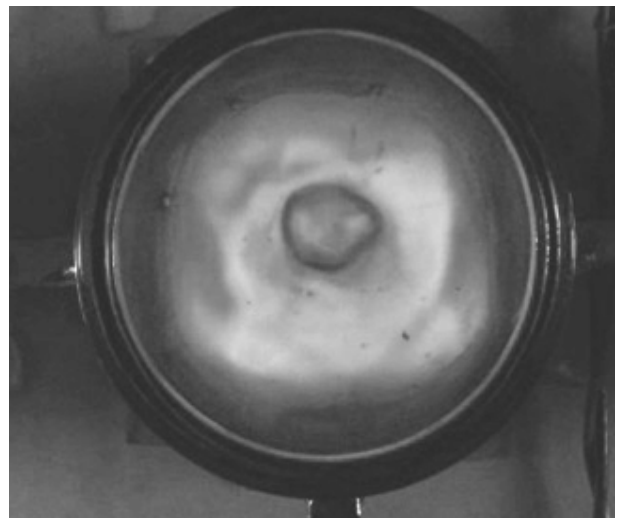
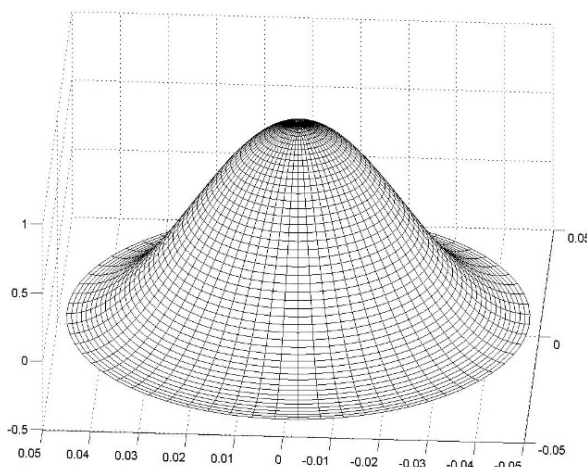


Рис. 3.5. Форма ультразвукового поля в циліндричній камері у випадку збудження радіальної моди коливань поверхні

В разі збудження радіально-згинальних коливань циліндричної поверхні камери в об'ємі камери утворюється ультразвукове поле середньої інтенсивності з великою кількістю вузлів та пучностей. Якщо ця інтенсивність буде перевищувати поріг виникнення кавітації за даних умов, то кавітаційна область розповсюдиться по всьому об'єму камери (рис. 3.6) [52].

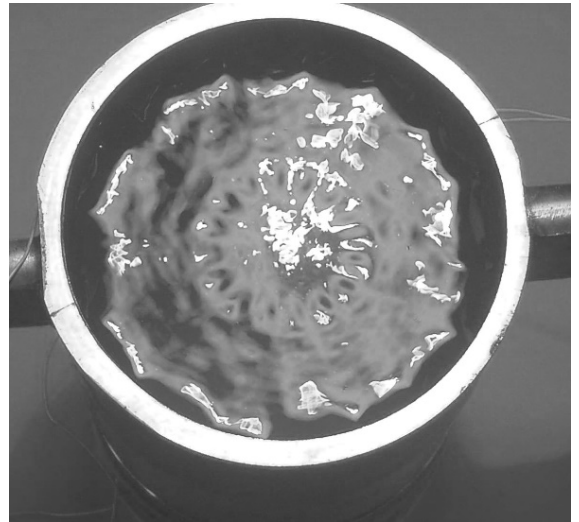
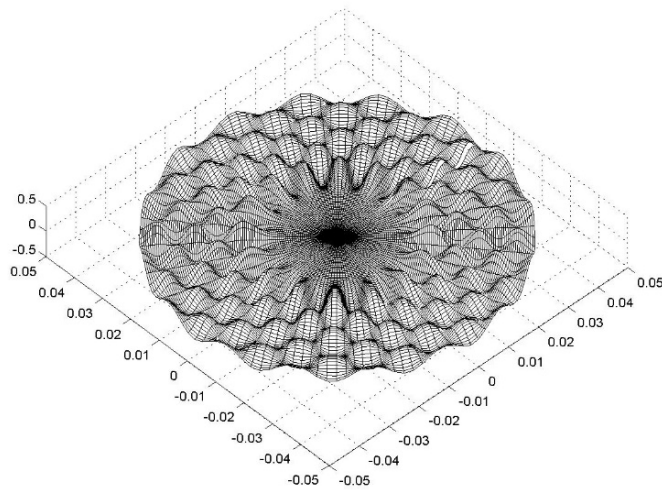


Рис. 3.6. Форма ультразвукового поля в циліндричній камері у випадку збудження радіально-згинальних коливань поверхні

Для побудови ультразвукового фільтра з ефектом самоочищення необхідно всередині циліндричної резонансної камери розмістити циліндричний фільтрувальний елемент, а кавітаційну область організувати між внутрішньою поверхнею камери та зовнішньою поверхнею фільтрувального елемента. Тому, мабуть, доречним буде збудження поверхні кавітаційної камери на моді радіально-згинальних коливань.

Поздовжній розмір циліндричної кавітаційної камери згідно розрахункової схеми (рис. 3.4) повинен вміщувати парну кількість чвертей довжини хвилі деформації, що встановлюється по довжині камери. Причому на торцях циліндричної камери, де будуть розміщені торцеві кришки, повинні бути вузли хвилі деформації, що встановилася.

Для розрахунку довжини поздовжньої пружної хвилі деформації, тобто відстані між окремими групами п'єзоелектричних приводів-випромінювачів, що збуджуються синхронно, скористаємося циліндричною системою координат. Будемо вважати, що вісь X співпадає з віссю циліндричної камери, а середній радіус циліндричної камери дорівнює r .

Коливання циліндричної поверхні камери можна представити за допомогою вектору деформації \bar{U} як

$$\overline{U} = \overline{U}_l + \overline{U}_\tau, \quad (3.1)$$

де \overline{U}_l - потенціальна складова; \overline{U}_τ - соленоїдальна складова.

Згідно [108] довільне векторне поле можна представити у вигляді суми градієнта деякого скалярного поля Φ та ротора векторного потенціалу \overline{A} :

$$\overline{U} = \text{grad}\Phi + \text{rot}\overline{A}. \quad (3.2)$$

Будемо вважати, що в нашому випадку відсутні крутильні коливання. Тоді можна прийняти, що $\text{rot}\overline{A} = 0$.

Рівняння Геймгольца [109] для потенціалу Φ запишемо у вигляді:

$$c_T^2 \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (3.3)$$

де $c_T^2 = \frac{2\mu_l + \lambda_l}{\rho_k}$ - швидкість звуку в матеріалі циліндричної камери; λ_l

та μ_l - перший та другий коефіцієнти Ламме; ρ_k - щільність матеріалу камери.

Використовуючи метод Фур'є, розв'язок рівняння (3.3) будемо шукати у вигляді

$$\Phi = f(r) \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}, \quad (3.4)$$

де $f(r)$ - функція, що залежить від r ; θ - полярний кут; n - ціле число; γ_T - деяка стала величина.

Після підстановки виразу (3.4) у рівняння (3.3) для функції $f(r)$ отримаємо:

$$f'' + \frac{1}{r} f' + \left(\alpha^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) f = 0, \quad (3.5)$$

де $\alpha^2 + \gamma_T^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2}$; ω - колова частота; α - деяка стала величина.

Зробимо підстановку $x = \alpha r$. Це дасть можливість рівняння (3.5) привести до вигляду:

$$f(x)'' + \frac{1}{x} f(x)' + \left(1 - \frac{n^2}{x^2}\right) f(x) = 0. \quad (3.6)$$

Розв'язок отриманого рівняння Бесселя запишемо у вигляді суми циліндричних функцій Бесселя та Неймана [110], [111]:

$$f(r) = AJ_n(\alpha r) + BN_n(\alpha r), \quad (3.7)$$

де A та B - константи, що залежать від граничних умов; $J_n(\alpha r)$ -функція Бесселя порядку n ; $N_n(\alpha r)$ - функція Неймана порядку n .

Знайдемо компоненти вектора \bar{U} :

$$\begin{aligned} U_r &= f' \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}; \\ U_\theta &= -\frac{n}{r} f \sin n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}; \\ U_x &= -\gamma_T f \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

На вільній поверхні циліндричної камери нормальні складові тензора механічного напруження дорівнюють нулю, тобто:

$$\sigma_{rr} = 0 \Big|_{r=R_1; r=R_2}. \quad (3.9)$$

В циліндричній системі координат закон Гука можна виразити рівнянням [109]:

$$\sigma_{rr} = \lambda_n \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + 2\mu_n \frac{\partial U_x}{\partial r}. \quad (3.10)$$

Враховуючи вираз (3.8) після перетворень отримаємо:

$$\sigma_{rr} = \left[-\lambda_n (\alpha^2 + \gamma_T^2) f + 2\mu_n f'' \right] \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}. \quad (3.11)$$

Після виконання відповідних підстановок отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_n (\alpha^2 + \gamma_T^2) [AJ_n(\alpha R_1) + BN_n(\alpha R_1)] + 2\mu_n [AJ_n''(\alpha R_1) + BN_n''(\alpha R_1)] &= 0 \\ -\lambda_n (\alpha^2 + \gamma_T^2) [AJ_n(\alpha R_2) + BN_n(\alpha R_2)] + 2\mu_n [AJ_n''(\alpha R_2) + BN_n''(\alpha R_2)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Система рівнянь (3.12) буде мати ненульовий розв'язок відносно A та B у випадку, коли детермінант D даної системи дорівнює нулю, тобто коли справедливим є запис:

$$D = \left[2\mu_n J_n''(\alpha R_2) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} J_n(\alpha R_2) \right] \cdot \left[2\mu_n N_n''(\alpha R_1) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} N_n(\alpha R_1) \right] - \left[2\mu_n J_n''(\alpha R_1) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} J_n(\alpha R_1) \right] \cdot \left[2\mu_n N_n''(\alpha R_2) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} N_n(\alpha R_2) \right] = 0 \quad (3.13)$$

Рівняння (3.13) зручно розв'язати графічним методом відносно α та ω .

Це дозволяє отримати γ_T :

$$\gamma_T = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_T^2} - \alpha^2}. \quad (3.14)$$

Тоді відстань між ультразвуковими приводами-випромінювачами на зовнішній поверхні циліндричної кавітаційної камери вздовж осі X може бути знайдена як

$$l_x = \frac{2\pi}{\gamma_T}. \quad (3.15)$$

Для випадку радіально - згинальних коливань циліндричної поверхні кавітаційної камери резонансна частота визначається залежністю [112], [113]

$$f_{рез} = \frac{1}{2r^2\pi} c_T \frac{h_k}{\sqrt{12}} K_\lambda, \quad (3.16)$$

де h_k - товщина стінки камери; $K_\lambda = \sqrt{\frac{i^2(1-i^2)^2}{1+i^2}}$, i - число хвиль, розміщених по окружності кільця.

Таблиця 3.1. Значення коефіцієнта K_λ від числа хвиль, розміщених по окружності кільця.

i	2	3	4	5	6	7	8
K_λ	2,683	7,589	14,553	23,534	34,522	47,518	62,516

У випадку збудження радіальної моди коливань трубчастої циліндричної кавітаційної камери резонансна частота може бути розрахована за формулою [112], [113]

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho_k r^2}}, \quad (3.17)$$

де E - модуль пружності матеріалу труби кавітаційної камери при розтягуванні.

Узгодження резонансних частот радіальних або радіально-згинальних коливань з коливаннями по довжині камери досягається зміною геометричних розмірів циліндричної трубчастої заготовки.

Для збудження резонансних коливань циліндричної кавітаційної камери можуть бути застосовані п'єзоелектричні приводи - випромінювачі поздовжніх переміщень, побудовані у відповідності до 1, 1/2 або 3/4 хвильових акустичних схем. Доцільно застосовувати в даному випадку ультразвукові приводи-випромінювачі з напівхвильовою акустичною схемою, які забезпечують суттєве зменшення масо-габаритних характеристик фільтра з ефектом самоочищення. При цьому, для зменшення негативного впливу привода-випромінювача поздовжніх коливань на форму власних коливань кавітаційної камери ступінь малого діаметру трансформатора коливальної швидкості привода виконують ножевидною з розміщенням торцевої робочої поверхні на зовнішній поверхні камери вздовж твірної лінії.

Розрахунок акустичних розмірів ультразвукового п'єзоелектричного привода-випромінювача може бути здійснений з урахуванням відомої методики [52], [114]–[116].

Напівхвильовий складений п'єзоелектричний привід-випромінювач згідно розрахункової схеми (рис. 3.7) [52], [114] будується за принципом ультразвукового перетворювача Ланжевена, в якому одна з накладок, що понижують частоту (демпфуючі накладки), виконана у вигляді трансформатора коливальної швидкості, застосування якого дозволяє отримати необхідну величину амплітуди коливань вихідного торця випромінювача. Зазвичай, в якості трансформатора коливальної швидкості застосовують ступінчасті, конічні, експоненціальні, катеноїдальні та інші акустичні концентратори, які за

рахунок різниці площ вхідного та вихідного торців забезпечують збільшення амплітуди поздовжніх коливань.

В загальному вигляді рівняння поздовжніх коливань складеного ультразвукового привода-випромінювача можна записати як:

$$S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial \xi}{\partial x} \right), \quad (3.18)$$

де ξ - поздовжнє переміщення; c - швидкість звуку; S - площа поперечного перерізу; x - напрямок розповсюдження хвиль.

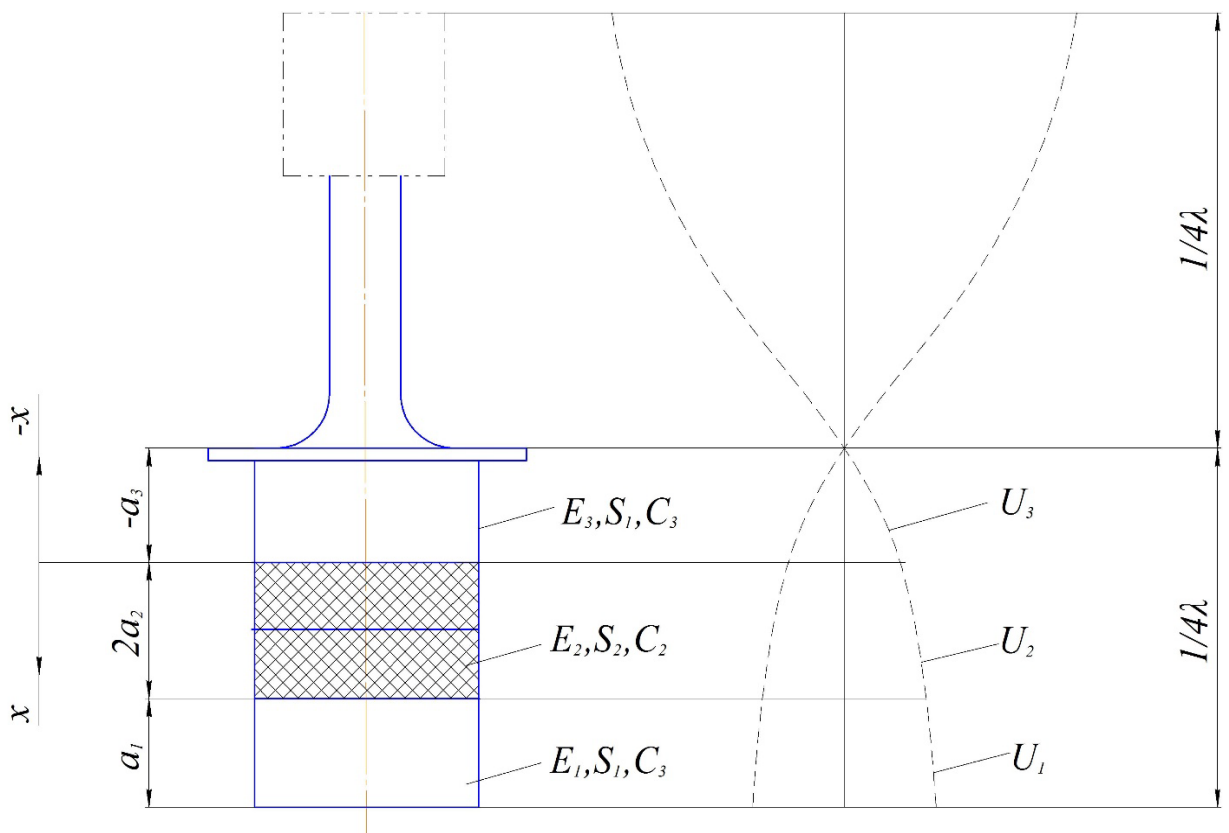


Рис. 3.7. Розрахункова схема напівхвильового привода-випромінювача

В разі застосування в приводі-випромінювачі ступінчастого трансформатора коливальної швидкості коефіцієнт трансформації буде становити:

$$K = \frac{S_{\delta}}{S_M}, \quad (3.19)$$

де S_{δ} - площа вхідного торця; S_M - площа вихідного торця (торця меншої площі).

Для акустичної системи, що розглядається, в разі збудження гармонійних коливань рішення загального рівняння (3.18) можна записати як:

$$\begin{aligned}\xi_1(x,t) &= \left(A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi) ; \\ \xi_2(x,t) &= \left(C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi) ; \\ \xi_3(x,t) &= \left(Q \cos \frac{\omega}{c_3} x + G \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi) .\end{aligned}\tag{3.20}$$

Згідно розрахункової схеми (рис. 3.7) граничні умови можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}\xi_3 &= 0 \text{ при } x = -a_3 ; \\ \left. \begin{aligned}\xi_2 &= \xi_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial \xi_3}{\partial x}\end{aligned} \right\} \text{ при } x = 0 ; \\ \left. \begin{aligned}\xi_2 &= \xi_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x}\end{aligned} \right\} \text{ при } x = 2a_2 ; \\ \frac{\partial \xi_1}{\partial x} &= 0 \text{ при } x = a_1 + 2a_2 .\end{aligned}\tag{3.21}$$

Приймаючи до уваги умову (3.21), можна з рівняння (3.20) отримати:

$$Q \cos \frac{\omega}{c_3} a_3 = G \sin \frac{\omega}{c_3} a_1 \quad \text{або} \quad Q = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 .\tag{3.22}$$

Тоді рівняння (3.20) прийме вигляд:

$$\xi_3(x,t) = G \left(\sin \frac{\omega}{c_3} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \cos \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi) .\tag{3.23}$$

Перша половина граничних умов (3.21) дозволяє з урахуванням рівнянь (3.20) та (3.23) записати:

$$C = Gtg \frac{\omega}{c_3} a_3. \quad (3.24)$$

Друга половина умов (3.21) після диференціювання рівнянь (3.20) та (3.23) дозволяє записати:

$$E_2 S_2 \frac{D}{c_2} = E_3 S_1 \frac{G}{c_3} \text{ або } \frac{D}{G} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 c_2}{S_2 c_3}. \quad (3.25)$$

Тоді, спільне рішення рівнянь (3.24) та (3.25) дозволяє отримати:

$$\frac{D}{C} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 c_2}{S_2 c_3 tg \frac{\omega}{c_3} a_3}. \quad (3.26)$$

Гранична умова (3.21) дозволяє привести рівняння (3.20) до вигляду:

$$B = A tg \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2). \quad (3.27)$$

З урахуванням (3.27) рівняння (3.20) перепишемо у вигляді:

$$\xi_1(x, t) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + tg \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} x \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (3.28)$$

Приймаючи до уваги першу половину умов (3.21), рівняння (3.20) та (3.28) можна записати у вигляді:

$$C \left(\cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \frac{D}{C} \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + tg \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]. \quad (3.29)$$

Друга половина граничних умов (3.21) дозволяє після диференціювання записати рівняння (3.29) в наступному вигляді:

$$C \left(\frac{D}{C} \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = A \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \left[tg \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \quad (3.29)$$

Поділ виразу (3.29) на (3.30), а також врахування співвідношення (3.26) дає можливість отримати:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \arctg \frac{E_3 S_1 c_2 \left(N \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left(N \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)},$$

де

$$N = \frac{E_2 S_2 c_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}{E_1 S_1 c_2 \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}.$$

Для розрахунку поздовжнього розміру a_3 акустичної розрахункової схеми (рис. 3.7) за допомогою формули (3.31) необхідно задатися бажаними величинами товщини накладки, що понижує частоту, та маркою конструкційного матеріалу, з якого вона буде виготовлена, а також обрати марку п'єзокераміки з її параметрами.

Поздовжній розмір a_4 (рис. 3.7) ступеню малої площі трансформатора коливальної швидкості можна отримати із залежності

$$a_4 = \frac{c_3}{4f}.$$

Розмір, розрахований згідно формули (3.32), необхідно скорегувати (зменшити) в залежності від приєднаної маси на робочому торці трансформатора коливальної швидкості. Приєднана маса залежить від моди збуджуваних коливань та способу кріплення акустичної резонансної системи.

Інколи, з метою зменшення габаритів та підвищення потужності проточного ультразвукового кавітаційного обладнання трубчасту кавітаційну камеру виконують з окремих ущільнених трубчастих кілець-вібраторів, довжина яких менша за $\frac{1}{2}$ згинальної хвилі деформації. Це дозволяє позбутися згинальних коливань по довжині циліндричної кавітаційної камери, а, відповідно, і зон з вузлами коливань, в області яких кавітація не збуджується [117]–[119].

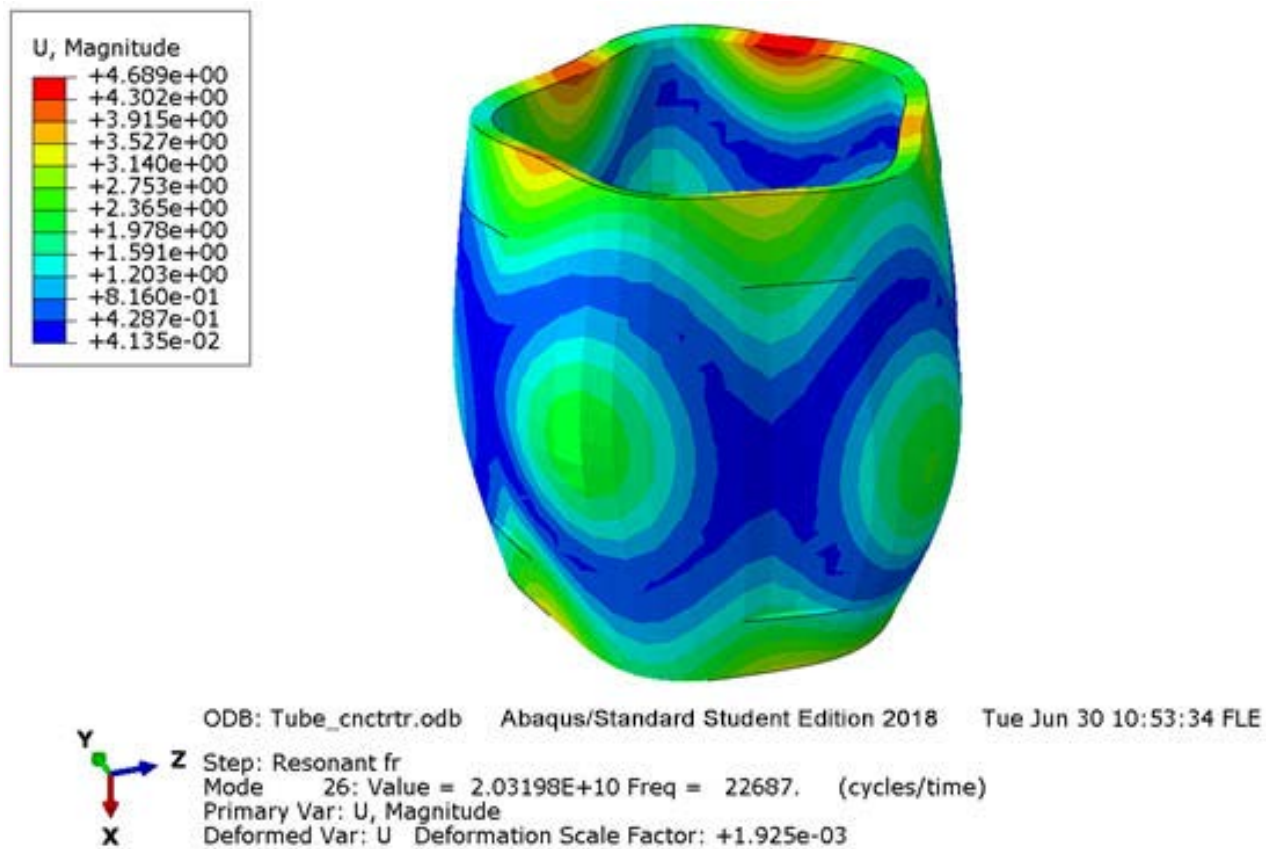


Рис. 3.8. Моделювання роботи циліндричної камери, збудженої на радіально-згинальній моді коливань

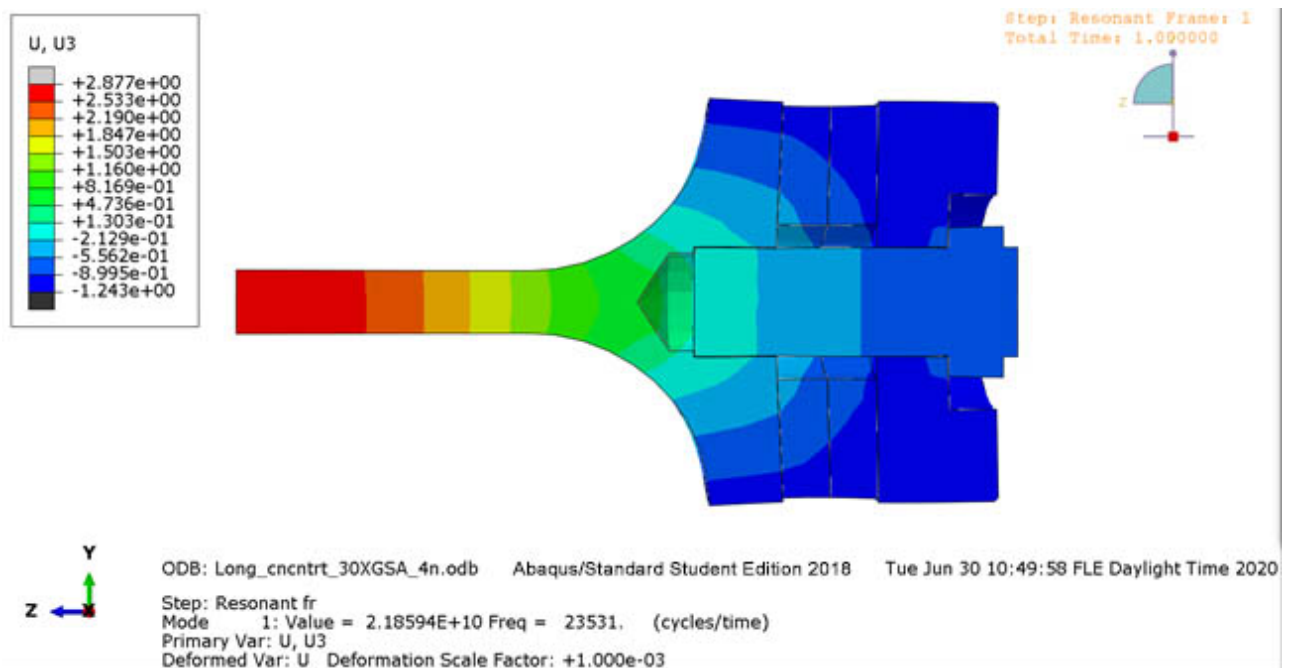


Рис. 3.9. Моделювання роботи $\frac{1}{2}$ -хвильового привода-випромінювача поздовжніх коливань

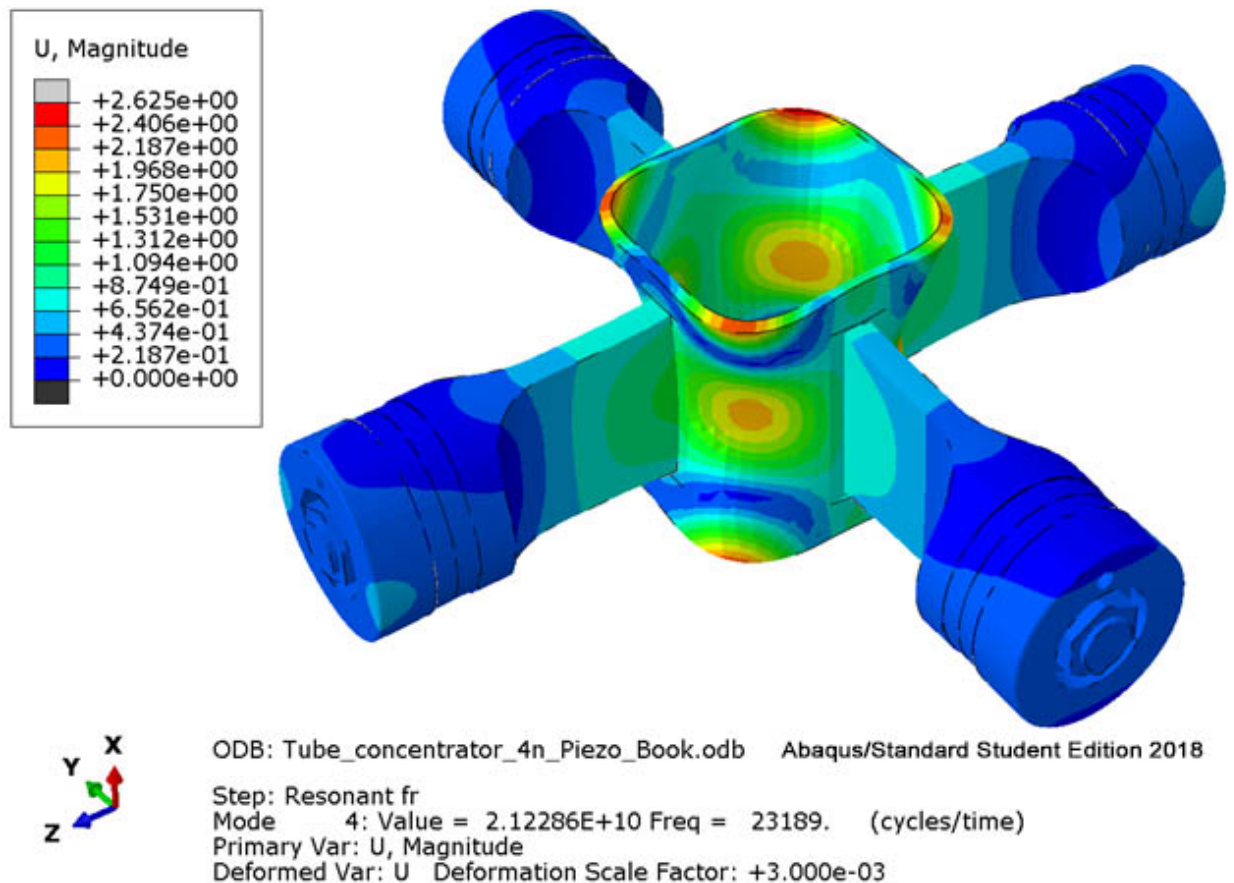


Рис. 3.10. Моделювання роботи ультразвукової кавітаційної секції з трубчастим вібратором

Для перевірки коректності обмежень та припущень, використаних в наведеній методиці, було проведено моделювання роботи акустичної системи, що розглядається, в програмному середовищі Abaqus Student Edition 2018 (рис. 3.8, рис. 3.9, рис. 3.10).

Запропонована методика розрахунку ультразвукових проточних кавітаторів з трубчастим вібратором дозволила спроектувати та виготовити модульну кавітаційну секцію (рис. 3.11) для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій. Наступним кроком необхідно провести експериментальне дослідження ультразвукової кавітаційної секції.

Практична перевірка представленої методики розрахунку резонансних акустичних систем підтвердила її достатню точність за умови застосованих припущень. Це дозволило створити ефективне ультразвукове кавітаційне

технологічне обладнання, яке знайшло впровадження в кавітаційних технологій в різних сферах.



Рис. 3.11. Модульна ультразвукова кавітаційна секція з трубчастим вібратором

Розділ 4. Експериментальне дослідження роботи ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення

4.1. Дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів на основі планування багатофакторного експерименту

При використанні явища ультразвукової кавітації для самоочищення фільтрувальних перегородок виникає загроза руйнування самих перегородок.

Для реалізації саморегенеруючого фільтра необхідно вирішити наступні питання:

- який конструкційний матеріал найбільш стійкий до ультразвукової кавітаційної ерозії?
- які фактори впливають на швидкість кавітаційної ерозії?

Для відповіді на ці питання були проведені дослідження, наведені нижче.

Незважаючи на значну кількість робіт [120]–[127], що вивчають механізми ультразвукової кавітації, ці питання вивченні не повністю.

Кавітаційний процес призводить до ультразвукової кавітаційної ерозії матеріалів, тобто до відносної втрати матеріалів, з яких виготовляють фільтрувальні перегородки. Причинами ускладнення дослідження є швидкоплинність цих процесів, а також те, що ультразвукова кавітаційна ерозія відбувається у незначних об'ємах. Руйнування кавітаційної бульбашки починається з розміру 10^{-2} мм. Додаткові ускладнення створюють значні локальні тиски та температури. Основними механізмами кавітаційної ерозії, дослідники вважають - механізм ударної хвилі [128], [129] та механізм ударних енергоємних мікроструменів [84], [97].

Для проведення експериментальних досліджень кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів був розроблений стенд, який мав можливість змінювати інтенсивність ультразвукових коливань в широких межах. Для цього було запропоновано використати циліндричну кавітаційну камеру, яка збуджується на радіальній моді резонансних коливань за допомогою

п'єзоелектричних приводів поздовжніх переміщень, встановлених на зовнішній твірній поверхні трубчастої камери (рис. 3.11). Звести до мінімуму спотворення коливань в місцях кріплення п'єзоелектричного приводу до зовнішньої твірної поверхні трубчастого вібратора пропонується за рахунок виконання вихідного торця трансформатора швидкості у вигляді ножевидного профілю.

Внутрішня поверхня випромінювання трубчастого кавітатора забезпечує концентрацію ультразвукової енергії здовж осі камери (рис.4.1). Резонансна частота власних коливань кавітаційної камери складала 22,5 КГц. Визначення геометричних розмірів запропонованої кавітаційної камери було виконано згідно методики, представленої в розділі 3 [130].

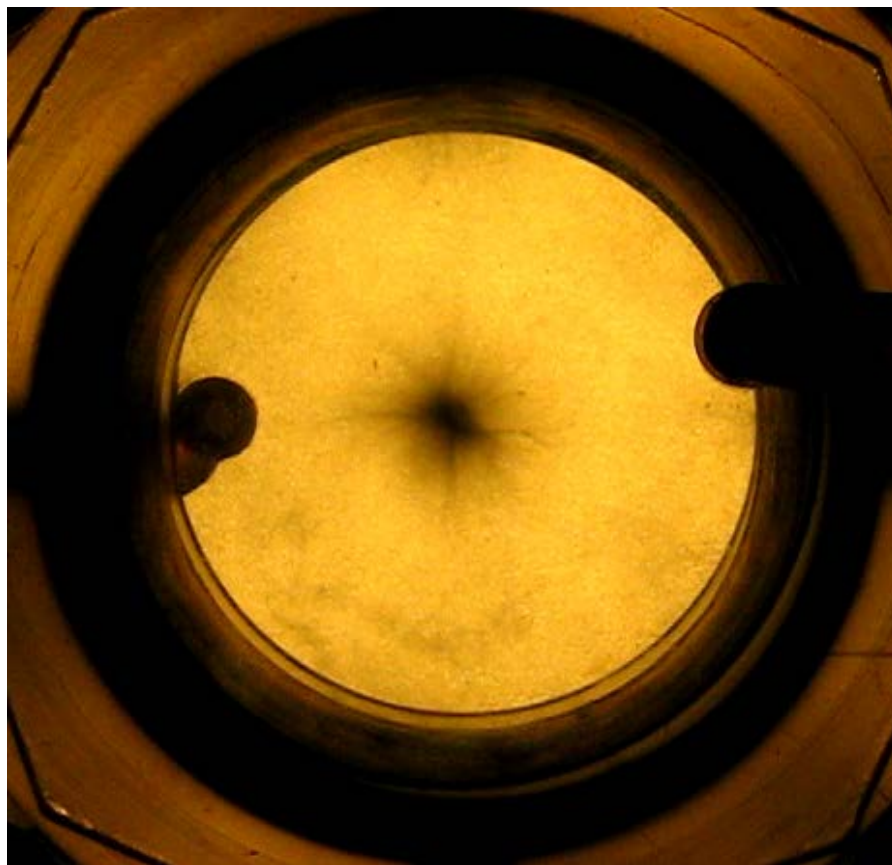


Рис. 4.1. Кавітаційна область в центральній частині камери, яка збуджується на радіальній моді коливань (візуалізація виконана через торцеве скло)

Для експериментального дослідження за допомогою представленої циліндричної кавітаційної камери було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд (рис. 4.2). Здовж осі камери встановлювався циліндричний випробуваний зразок, виконаний у вигляді стрижня діаметром 8 мм (рис. 4.3).

В експериментальній установці інтенсивність ультразвуку можна було регулювати в межах $2...100 \text{ Вт/см}^2$ напругою живлення ультразвукових перетворювачів.

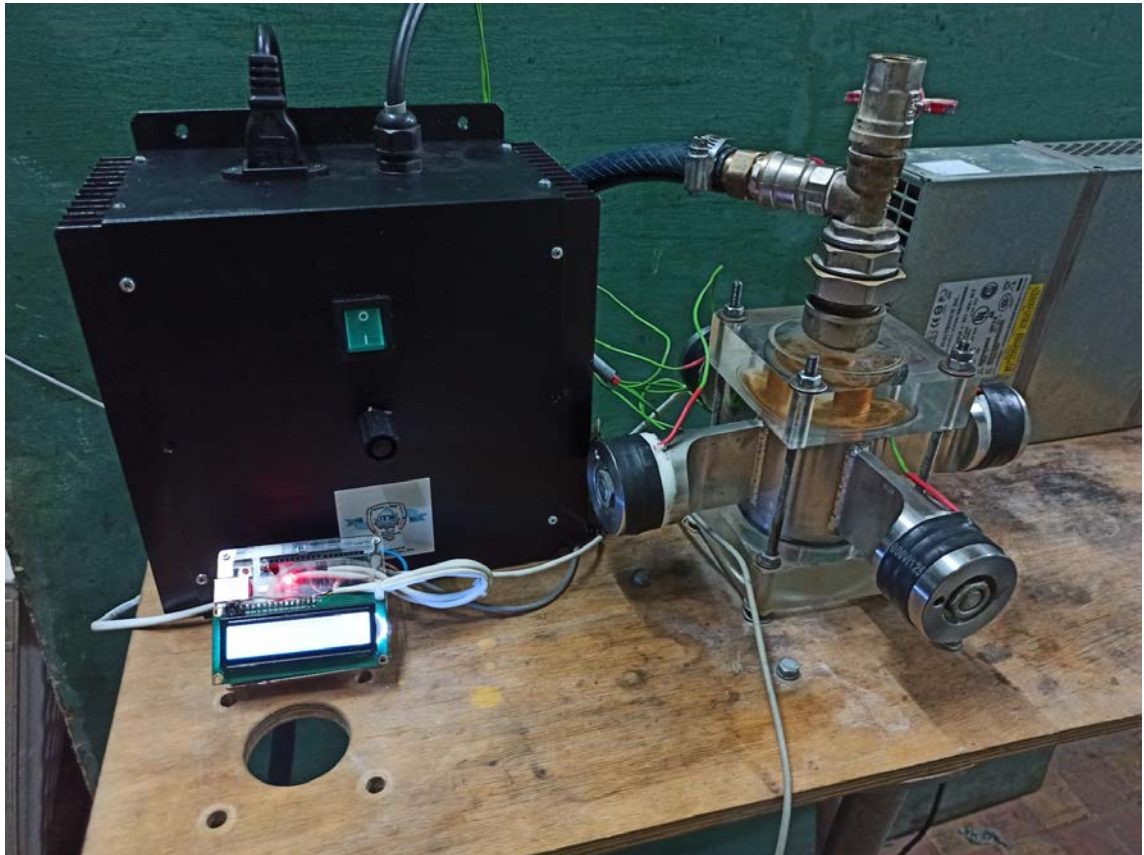


Рис. 4.2. Зовнішній вигляд стенда для проведення експериментальних досліджень кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів

Для підвищення достовірності результатів за рахунок стабілізації режиму кавітації в камері була створена замкнута система циркуляції робочої рідини, що забезпечило підтримку постійної кількості зародків кавітації (рис. 4.4). Щоб дослідити вплив ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали було обрано декілька різних матеріалів і сплавів, що використовуються у машинобудуванні. При проведенні випробувань було обрано наступні умови: рідина – вода (H_2O); температура робочої рідини 293 К; тиск у випробувальній камері становив – 0,2 МПа [118]; час випробування – 0-240 хв; витрата рідини через випробувальну камеру 2 л/хв. У якості параметру оцінки ерозійної

стійкості матеріалу, що досліджувався, було обрано кількість винесеного матеріалу у період розвиненої кавітації.

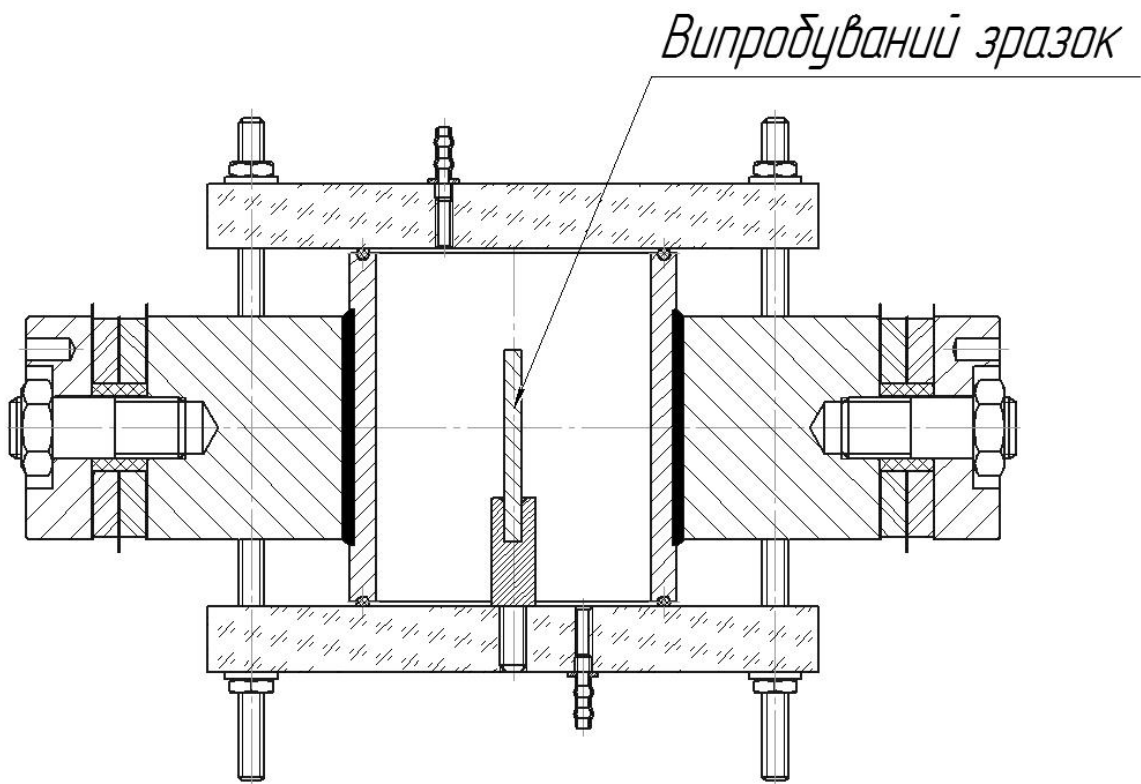


Рис. 4.3. Ультразвукова установка для проведення експериментальних досліджень кавітаційній ерозії конструкційних матеріалів

Усі експериментальні зразки конструкційних матеріалів, які зроблені у вигляді стрижнів, встановлювалися у центрі циліндричної ультразвукової камери, де спостерігається максимальна інтенсивність кавітації (рис. 4.3). Перед кожним випробуванням дослідні зразки ретельно промивалися спиртом та висушувалися у сушильній шафі протягом 30 хв за температури 373 К. Зважування зразків проводилося до і після випробування за допомогою високоточних аналітичних ваг серії AXIS AD50. Ваги 4 класу точності дозволяють визначити вагу випробувального зразку з точністю до 0,001г. Зважування проводилось 5 разів для підвищення точності.

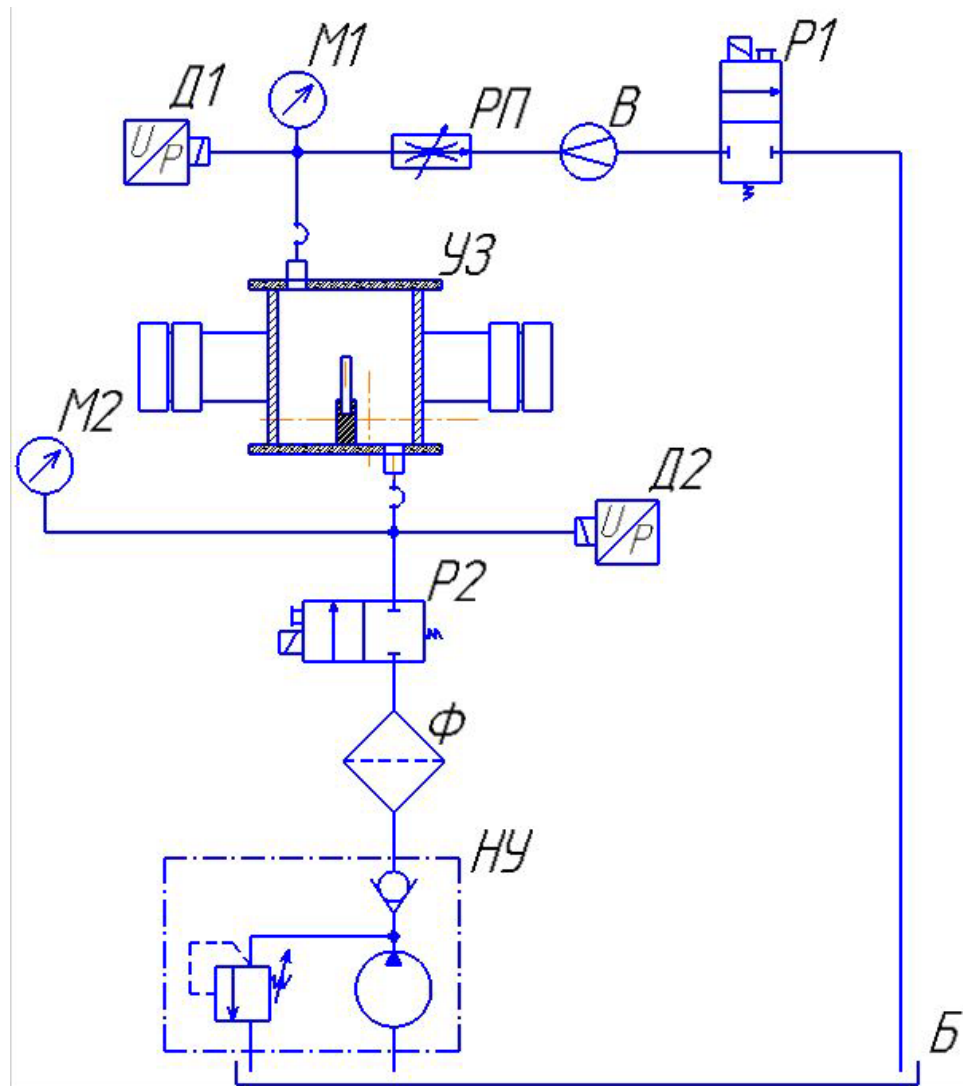


Рис. 4.4. Принципова електрогідравлічна схема експериментального стенду (УЗ – ультразвукова камера, М1, М2 – манометри, Д1, Д2 – датчики, РП – розподільник потоку, В – витратомір, Р1, Р2 – розподільники, Ф – фільтр, НУ – насосна установка, Б – бак)

4.1.1 Обґрунтування методики моделювання

Попередні експериментальні дослідження [131] показали, що механізм кавітаційної ерозії в основному залежить від потужності кавітації (W , Вт), її тривалості (t , хв) та конструкційного матеріалу фільтрувальних перегородок, що характеризується модулем Юнга (E , ГПа) і описується функцією:

$$\Delta V = f(W, t, E) [\%], \quad (4.1)$$

де W – потужність кавітаційного пристрою, Вт; t – тривалість кавітації, хв; E – модуль Юнга, ГПа; ΔV – відносна втрата об'єму матеріалів;

Наведені результати попередніх досліджень показують, що подальше вивчення зміни об'єму матеріалів при кавітаційних процесах може здійснюватися одним з методів моделювання. Дослідження впливу перерахованих вище факторів на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів при проведенні однофакторних експериментів пов'язано із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому, доцільно провести багатофакторний експеримент для отримання рівняння регресії для функції відгуку – відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів. Серед існуючих методів моделювання [132]–[134] процесу зміни відносного об'єму матеріалу фільтрувальних перегородок з різних конструкційних матеріалів при кавітації в залежності від потужності кавітації та її тривалості може здійснюватися з використанням одного із алгоритмів групового врахування аргументів (МГВА) [135], [136], а саме МГВА з активними нейронами [137].

МГВА [136] можливо використовувати в різноманітних сферах для аналізу даних та знаходження закономірностей, прогнозування і моделювання систем, розпізнавання образів та оптимізації. МГВА відноситься до типу індуктивних алгоритмів, що дають можливість використовувати генератор моделей, які поступово ускладнюються, та вибору набору моделей, що мають найвищу точність наявних алгоритмів. МГВА складається з низки алгоритмів, що дозволяють вирішити широкий спектр завдань. В нього входять як параметричні алгоритми, так і алгоритми кластеризації, комплексування аналогів, ребінаризації та ймовірнісні алгоритми. Вхідні дані поділяються на навчальну та перевірочну множини. Навчальна множина призначена для знаходження коефіцієнтів моделі, в той час як перевірочна множина призначена для визначення точності моделі на базі отриманих коефіцієнтів.

Існують два, найбільш розповсюджених, алгоритми МГВА:

- комбінаторний (спрощений метод);
- метод на базі активних нейронів.

Комбінаторний метод МГВА [137] - це поліноміальна функція з лінійними параметрами. Комбінаторна модель - це підмножина доданків поліноміальної функції, породженої заданим набором змінних.

Метод на базі активних нейронів[137], використовує комбінаторний алгоритм для оптимізації зв'язку нейронів. Алгоритм ітеративно створює шари нейронів з двома або більше входами. Алгоритм зберігає лише обмежений набір оптимально складних нейронів, які ми позначаємо як початкову ширину шару. Кожен новий шар створюється за допомогою двох або більше нейронів, взятих з будь-якого з попередніх шарів. Кожен нейрон в мережі застосовує функцію передачі (як правило, з двома змінними), що дозволяє вичерпному комбінаторному пошуку вибрати функцію передачі, яка найбільш точно прогнозує перевірочні дані. Функція передачі зазвичай має квадратичну або лінійну форму.

Перевагами алгоритмів МГВА є:

- побудова поліноміальних моделей будь-якої розмірності вихідних даних, коли невідомі структура моделі і коефіцієнти;
- використання неоптимальних статичних планів проведення експериментів та статичної інформації діючих процесів;
- побудова моделей на коротких вибірках інформації.

Побудова моделей з використанням алгоритмів МГВА здійснюється на основі поділу інформаційних даних на дві послідовності - навчальну та перевірочну.

Незалежно від активного чи пасивного експеримента при моделюванні з використанням МГВА необхідно:

- вибрати кількість досліджуваних змінних;
- визначитися з межами їх зміни;
- визначити рівні зміни факторів;
- визначити загальну кількість експериментів.

Використання алгоритмів МГВА не обмежує для моделювання процесів кількість змінних (факторів). Обмеження кількості змінних обумовлюється метою моделювання та можливістю практичної інформації.

При дослідженні зазначеного процесу в відповідності до (4.1) кількість досліджуваних змінних (факторів) дорівнює трьом. Межі зміни цих факторів обумовлюються межами зміни W , t і E , при яких одержана функція (4.1). Згідно [131] регресійна модель побудована в межах зміни:

- W , потужність ультразвукового кавітаційного пристрою – 160...400 Вт;
- t , час обробки в кавітаційному середовищі – 0...240 хв;
- E , модуль Юнга матеріалу – 55...215 ГПа.

В даному дослідженні зазначені межі зміни W , t і E і обумовлюють вибір меж зміни цих факторів при моделюванні процесу ультразвукової кавітації ерозії. Регресійна модель буде достовірною в даних межах.

Досвід попереднього моделювання різних процесів показує, що задовільні результати можна одержати при зміні факторів на п'яти рівнях і п'яти-шести точках (експериментів) на один фактор [138].

При виборі комбінацій і масштабного простору, в якому вводиться в алгоритмах МГВА вихідна інформація, бажано враховувати попередній досвід, яким описується досліджуваний процес.

Для зручності подальшого конструювання фільтрувальної установки, втрата об'єму матеріалу внаслідок кавітаційної ерозії доцільно розраховувати в безрозмірному вигляді.

Згідно (4.1) в якості вектора вихідних даних при визначенні моделей будуть:

$$x'_1 = W, x'_2 = t, x'_3 = E. \quad (4.2)$$

Збільшення рядів селекції (ускладнення моделі) здійснюється до тих пір, поки зменшується похибка апроксимації.

Одержана модель аналізується з точки зору її можливостей опису фізичної сутності. При цьому, перш за все, перевіряються найбільш загальні положення та вимоги.

За даними аналізу проводиться корегування структури моделі та уточнюються її коефіцієнти.

Відкоригована по структурі та уточнена модель перевіряється експериментально та підлягає статичній перевірці дослідженому процесу.

4.1.2 Математична модель ультразвукового кавітаційного процесу

Побудова математичної моделі впливу параметрів кавітації ультразвукової кавітації на втрату об'єму ΔV конструкційних матеріалів передбачає встановлення взаємозв'язку між параметрами процесу (W - потужність, t - час, E – модуль Юнга).

Метою моделювання є визначення впливу параметрів ультразвукового кавітаційного реактора на втрату об'єму різних матеріалів і на цій основі розробка рекомендацій з вибору матеріалів і умов утворення ультразвукової кавітації. Моделювання проводилось з використанням кавітаційного пристрою з регульованого потужністю від 100 Вт до 400 Вт на матеріалах з різними значеннями Юнга.

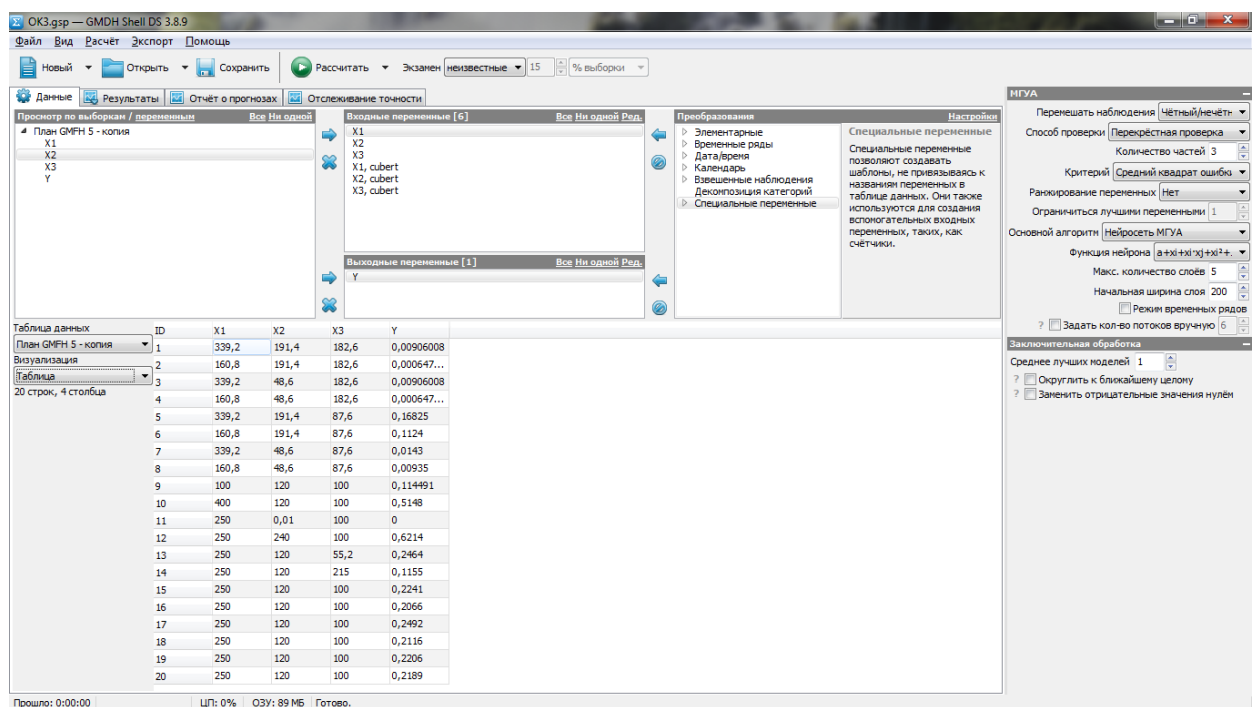


Рис. 4.5. Введения даних в програму GMDH Shell DS 3.8.9

В якості вихідного параметра моделі (y) прийнята відносна втрата об'єму при ерозії - ΔV , виміряна в %. Границі змінних наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Фактори, досліджувані при математичному моделюванні

Фактори	Нижній	Верхній
W, Вт	100	400
t, хв	0,01	240
E, ГПа	50	250

Зазначені змінні вводились в програму спрощеного МГВА на базі активних нейронів GDMN Shell DS 3.8.9 [139] рис. 4.5 в масштабному просторі, визначеному (4.2). Матриця експериментальних даних наведена в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Інформаційна матриця експериментальних даних

№	Функції			Прийняті значення x			Y, %
	W, Вт	t, хв	E, ГПа	x'_1	x'_2	x'_3	
1	339,2	191,4	182,6	339,2	191,4	182,6	0,00906008
2	160,8	191,4	182,6	160,8	191,4	182,6	0,00064715
3	339,2	48,6	182,6	339,2	48,6	182,6	0,00906008
4	160,8	48,6	182,6	160,8	48,6	182,6	0,00064715
5	339,2	191,4	87,6	339,2	191,4	87,6	0,16825
6	160,8	191,4	87,6	160,8	191,4	87,6	0,1124
7	339,2	48,6	87,6	339,2	48,6	87,6	0,0143
8	160,8	48,6	87,6	160,8	48,6	87,6	0,00935
9	100	120	100	100	120	100	0,11449062
10	400	120	100	400	120	100	0,5148
11	250	0,01	100	250	0,01	100	0
12	250	240	100	250	240	100	0,6214
13	250	120	55,2	250	120	55,2	0,2464
14	250	120	215	250	120	215	0,1155
15	250	120	100	250	120	100	0,2241
16	250	120	100	250	120	100	0,2066
17	250	120	100	250	120	100	0,2492
18	250	120	100	250	120	100	0,2116
19	250	120	100	250	120	100	0,2206
20	250	120	100	250	120	100	0,2189

Задача синтезу моделі з використанням спрощеного алгоритму МГВА полягає в побудові функції

$$F(x'_1 = W, x'_2 = t, x'_3 = E) = M(\bar{x'}), \quad (4.3)$$

де $M(\bar{x'})$ – математичне очікування середньої величини y' , $F(x'_1 = W, x'_2 = t, x'_3 = E)$ – невідомий по структурі та по виду оператор (функціональний зв'язок).

В результаті обробки експериментальних даних при досягненні мінімального значення похибки апроксимації (табл. 4.3) на п'ятому ряду селекції була одержана модель процесу ультразвукової кавітаційної ерозії виду.

Таблиця 4.3 Точність отримана в результаті моделювання

Максимальне від'ємне відхилення	-0,0256186
Максимальне додатне відхилення	0,0205366
Середній модуль помилки (MAE)	0,00823742
Середньоквадратичне відхилення (RMSE)	0,010939
Сума відхилень	3,98293E-15
Стандартне відхилення залишків	0,0110594
Коефіцієнт детермінації (R^2)	0,995587
Кореляція	0,997791

$$\begin{aligned}
 y &= -0.00665342 + 1.43019 * n_{47} + 6.46994 * n_{47} \\
 &\quad * n_{15} - 6.66151 * n_{47}^2 - 0.345979 * n_{15} \\
 n_{15} &= 0.169846 - 0.00166224 * x_1 + 0.00419129 * x_1 \\
 &\quad * n_{47} + 3.50203e^{-6} * x_1^2 \\
 n_{47} &= 0.0241886 + 15.5951 * n_{92} - 2986.3 * n_{92} * n_{96} \\
 &\quad + 1524.51 * n_{92}^2 - 15.4387 * n_{96} \\
 &\quad + 1461.96 * n_{96}^2 \\
 n_{96} &= -0.00206682 - 0.743211 * \sqrt[3]{x_3} * n_{117} \\
 &\quad + 4.60507 * n_{117} \\
 n_{92} &= -0.00406738 + 6.27789 * n_{116} * n_{117} \\
 n_{116} &= 0.345412 - 0.00154868 * x_3 \\
 n_{117} &= -0.0460626 + 0.00894853 * \sqrt[3]{x_2^2}.
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

В результаті підстановки натуральних значень \bar{x} модель (4.4) відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів згідно проведеного моделювання набула вигляд:

$$\begin{aligned}
 y &= -0.00665342 + 1.43019 * n_{47} + 6.46994 * n_{47} \\
 &\quad * n_{15} - 6.66151 * n_{47}^2 - 0.345979 * n_{15} \\
 n_{15} &= 0.169846 - 0.00166224 * W + 0.00419129 * W \\
 &\quad * n_{47} + 3.50203e^{-6} * W^2 \\
 n_{47} &= 0.0241886 + 15.5951 * n_{92} - 2986.3 * n_{92} * n_{96} \\
 &\quad + 1524.51 * n_{92}^2 - 15.4387 * n_{96} \\
 &\quad + 1461.96 * n_{96}^2 \\
 n_{96} &= -0.00206682 - 0.743211 * \sqrt[3]{E} * n_{117} + 4.60507 \\
 &\quad * n_{117} \\
 n_{92} &= -0.00406738 + 6.27789 * n_{116} * n_{117} \\
 n_{116} &= 0.345412 - 0.00154868 * E \\
 n_{117} &= -0.0460626 + 0.00894853 * \sqrt[3]{t^2}.
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

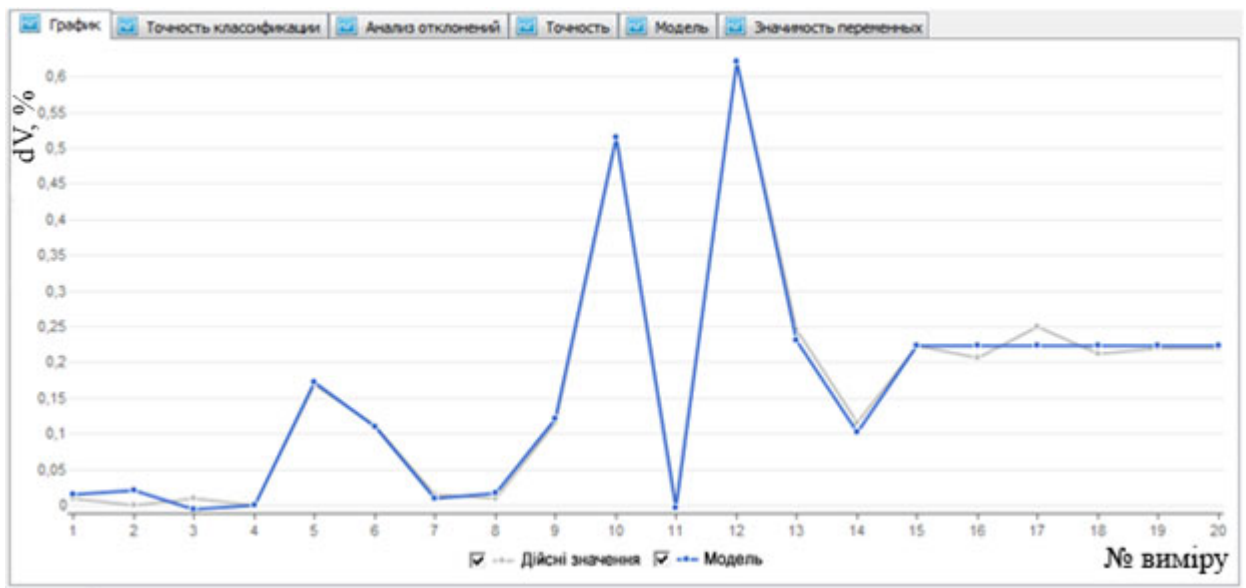


Рис. 4.6. Графік порівняння значень, отриманих в результаті експерименту зі значеннями розрахованих за моделлю.

Після перевірки адекватності дана модель була прийнята для подальшого аналізу впливу параметрів процесу на відносну втрату об'єму

матеріалу (ΔV) при ультразвуковій кавітації. Коефіцієнт кореляції склав $R=0,997$, що свідчить про високу точність одержаних результатів.

График Точность классификации Анализ отклонений Точность Модель Значимость переменных					
Вклад Частота					
№	Если заместить средним значением	Влияние на СКО	Графически	СКО	
1	X3	6,92E05%		1319,04	
2	X3, cubert	4,402E05%		838,972	
3	X2, cubert	58,49%		0,122424	
4	X1	31,56%		0,0711011	
	[Ничего не замещено]	0%		0,010939	
	[Замещено всё]	100%		0,201543	

Рис. 4.7. Вплив факторів моделі на відносну втрату об'єму матеріалу (ΔV) ($X1$ – Потужність, $X2$ – час обробки, $X3$ – модуль Юнга)

Як видно з рис. 4.7, серед досліджених параметрів найбільше на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів впливає Модуль Юнга матеріалу, а найменше – потужність кавітації.

Після обробки отриманих результатів було побудовано ряд графічних залежностей, які дають нам чітку картину стійкості конструкційних матеріалів в кавітаційній камері при різних потужностях (рис. 4.8 і рис. 4.9).

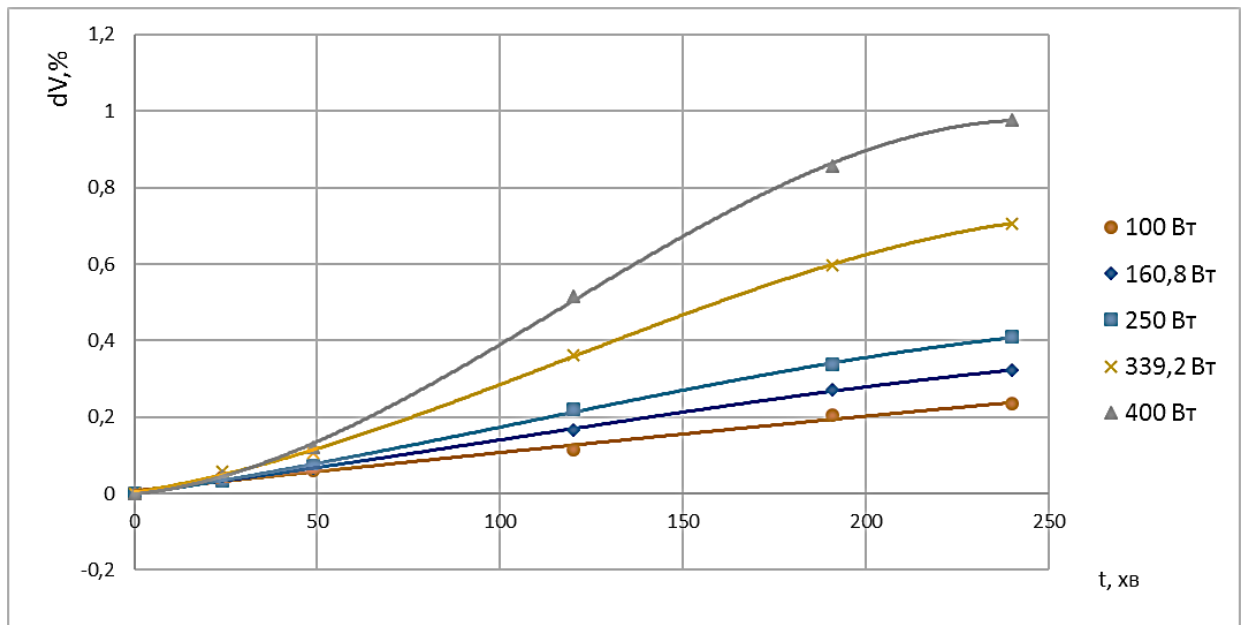


Рис. 4.8. Залежність втрати маси зразку з чавуну СЧ20 від часу обробки при різних потужностях ультразвукового кавітатора

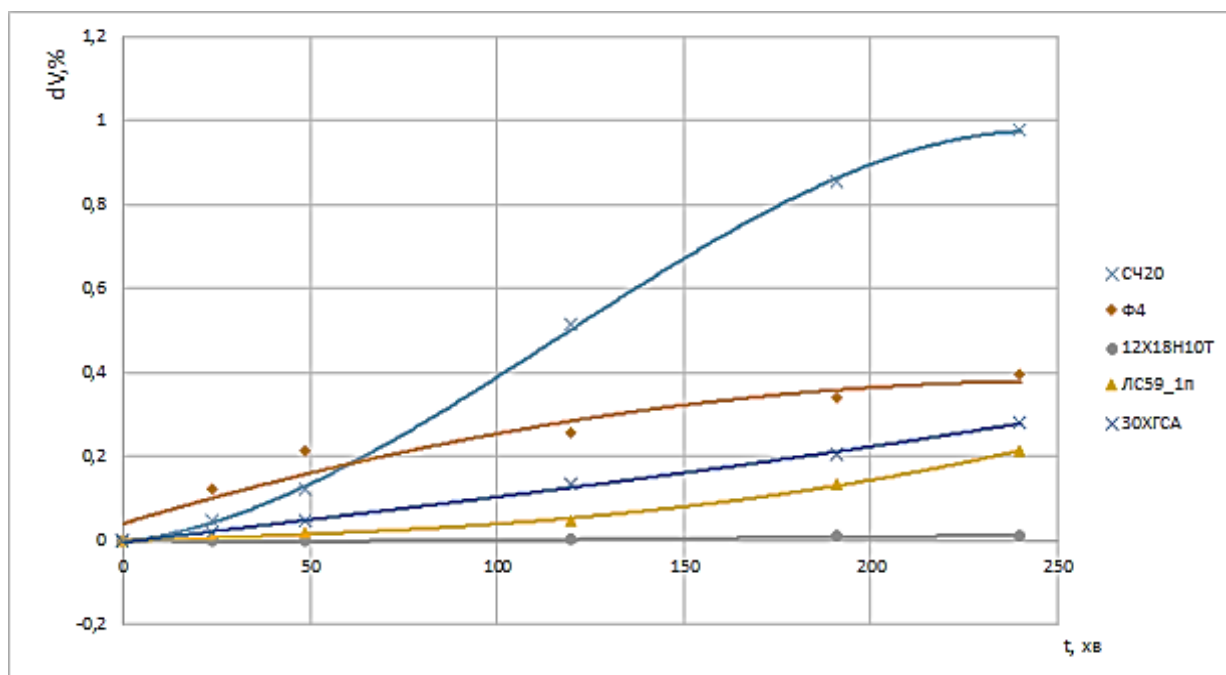


Рис. 4.9. Залежність втрати маси досліджуваного зразка від часу обробки при споживаній потужності ультразвукового кавітатора 400 Вт

Методом планування багатофакторного експерименту було отримано рівняння регресії, яке дозволяє адекватно описати залежність такої цільової функції, як відносна втрата об'єму конструкційних матеріалів від основних параметрів впливу, таких, як потужність кавітаційного пристрою, тривалість кавітації та модуль Юнга і може бути використане для математичного моделювання процесу ультразвукової кавітації.

Встановлено, що серед досліджених параметрів найбільше на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів впливає Модуль Юнга матеріалу зразка, а найменше – потужність кавітаційного генератора.

Отримані результати дозволяють оцінити кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів і виконати обґрунтований вибір матеріалів для застосування в ультразвуковому технологічному обладнанні. В результаті найбільш доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах є сталь 12Х18Н10Т. Фторопласт Ф4, який спочатку планувалося використовувати, показав найгірший результат, що знизило доцільність його використання. Для підвищення довговічності і надійності ультразвукового кавітаційного обладнання необхідно розширити кількість типів

випробовуваних матеріалів, наприклад, залучити різні марки титану, поліпропілени та збільшити тривалість випробувань, оскільки отримані результати по витраті конструкційних матеріалів під дією кавітації ерозії свідчать, що для окремих, нехай навіть кавітаційно стійких, матеріалів характерним є вплив втомної міцності, при досягненні якої настає інтенсивне руйнування матеріалу.

4.1.3. Побудова регресивної моделі за методом Бокса-Вілсона

Регресійна модель була побудована за допомогою планування багатофакторного експерименту виду 2^3 методом Бокса-Уілсона [132]–[134].

Для побудови моделі були використані такі самі вихідні значення параметрів, що й в моделюванні методом МГВА:

- W , потужність ультразвукового кавітаційного пристрою – 160...400 Вт;
- t , час обробки в кавітаційному середовищі – 0...240 хв;
- E , модуль Юнга матеріалу – 55...215 ГПа.

Тому регресійна модель буде достовірною в даних межах.

Вибір діапазонів варіювання факторів функції (4.1) проводився таким чином, щоб будь-яка їх сукупність, в передбачених планом експерименту діапазонах, могла бути реалізована і не приводила до протиріч. Для цього було проведено пошукові експерименти для визначення області, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б стійко реалізовані.

Для зручності подальшого конструювання фільтрувальної установки втрата об'єму матеріалу внаслідок кавітаційної ерозії доцільно представляти в безрозмірному вигляді.

Всі відзначені фактори, які входять до функції (4.1), є величинами, що мають різну розмірність, а значення величин цих факторів мають різні порядки. Тому, для отримання поверхні відгуку цієї функції було проведено операцію

кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору [132] за формулою

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j}. \quad (4.6)$$

В результаті проведених пошукових експериментів для кожного фактору встановлені такі значення: \tilde{X}_{j0} – основний рівень фактору; X_{jmax} , X_{jmin} – верхній та нижній рівні фактору; zX_{jmax} , zX_{jmin} – максимальний та мінімальний рівні фактору; z – зіркове плече; I_j – інтервал варіювання.

Встановлено наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та зіркові значення $-1,681$, $+1,681$.

Істинні значення факторів, встановлені на основі проведення пошукових експериментів, наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,681	-1	0	+1	+1,681	
x_1 – потужність кавітаційного пристрою, Вт	100	160,8	250	339,2	400	89,2
x_2 – тривалість кавітації, хв	0	48,6	120	191,4	240	71,4
x_3 – модуль Юнга, ГПа.	55,2	87,6	135,1	182,6	215	47,5

Попередні експерименти показали, що залежність відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів від параметрів процесу ультразвукової кавітації не може бути адекватно описана ні лінійною, ні квадратичною регресійною моделлю, тому прийнято рішення про визначення квадратичної регресійної моделі від факторів впливу із дробовими степенями. Значення дробових степенів отримано в результаті попередніх пошукових експериментів. Таким чином, математична модель прийме вигляд:

$$\Delta V = f(W^{0.7306}, t^{2.282}, E^{1.155}) [\%]. \quad (4.7)$$

Для забезпечення значень такого фактору впливу, як модуль Юнга вибрано конструкційні матеріали із близькими значеннями даного параметра, вказані в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Модуль Юнга конструкційних матеріалів

Конструкційні матеріали	Ф4	СЧ20	ЛС59_1п	12Х18Н10Т	30ХГСА
E – модуль Юнга, ГПа	55,2	100	105	196	215

Таблиця 4.6. Дослідження втрати відносного об'єму від значень рівнів фактору

№ досліду	W , Вт Потужність	t , хв час	E , ГПа, Модуль Юнга		Δm , % Втрата об'єму
1	339,2	191,4	182,6	12Х18Н10Т	0
2	160,8	191,4	182,6	12Х18Н10Т	0
3	339,2	48,6	182,6	12Х18Н10Т	0
4	160,8	48,6	182,6	12Х18Н10Т	0
5	339,2	191,4	87,6	ЛС59 1п	0,16825
6	160,8	191,4	87,6	ЛС59 1п	0,1124
7	339,2	48,6	87,6	ЛС59 1п	0,0143
8	160,8	48,6	87,6	ЛС59 1п	0,00935
9	100	120	100	СЧ20	0
10	400	120	100	СЧ20	0,5148
11	250	0	100	СЧ20	0,1144
12	250	240	100	СЧ20	0,6214
13	250	120	55,2	Ф4	0,2464
14	250	120	215	30ХГСА	0,1155
15	250	120	100	СЧ20	0,2241
16	250	120	100	СЧ20	0,2066
17	250	120	100	СЧ20	0,2492
18	250	120	100	СЧ20	0,2116
19	250	120	100	СЧ20	0,2206
20	250	120	100	СЧ20	0,2189

Кількість дослідів для багатфакторного експерименту для квадратичної регресії визначалась за формулою:

$$N = 2^g + 2g + N_0(g), \quad (4.8)$$

де g – кількість факторів; 2 – кількість рівнів варіювання; N_0 – кількість дослідів в центрі плану, $N_0(k) = N_0(3) = 6$.

Для нашого випадку $N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 6 = 20$ дослідів.

Для проведення ротатабельного центрального композиційного планування (РЦКП) другого порядку на основі повнофакторного експерименту виду 2^3 було складено матрицю планування експерименту, яку наведено в табл. 4.7.

Після проведення експерименту було отримано значення функції для заповнення матриці планування (табл. 4.6).

Планувалось отримати наступну квадратичну регресійну модель із ефектами взаємодії 1-го порядку:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + \dots + b_{33} x_3^2 \quad (4.9)$$

де y – цільова функція (відносна втрата об'єму конструкційних матеріалів); $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{13}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Для визначення точкових оцінок $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{13}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ використовувався метод найменших квадратів [132]:

$$B = Y \Phi^T \Phi^{-1}, \quad (4.10)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_g \end{bmatrix}$ – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi^T \Phi$ – інформаційна матриця Фішера;

$Y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}$ – матриця, що містить результати експериментів за матрицею

планування (табл. 4.7);

$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,g} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,g} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,g} \end{bmatrix}$ – матриця, що містить значення факторів x_{ij} (де i

– номер дослідів за матрицею планування, j – номер фактора);

g – кількість факторів;

N – кількість дослідів за матрицею планування (табл. 4.7).

Адекватність регресійної моделі перевірялася за критерієм Фішера [132]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{відт}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (4.11)$$

де $S_{ад}^2$ – дисперсія адекватності; $S_{відт}^2$ – дисперсія відтворюваності; $[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера; $f_1 = N - dp$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності; $f_2 = N_0 - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності; dp – кількість значимих коефіцієнтів регресії (4.9).

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при $F > [F(f_1, f_2)]$ регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія адекватності визначалася за формулою [132]:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (4.12)$$

де y_i – результат i -го дослідів, проведеного за матрицею планування;

\tilde{y}_i – результат i -го значення дослідів, передбаченого за допомогою регресійної моделі (4.5).

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за t -критерієм Стюдента [132]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{відт} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (4.13)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Стюдента, яке рівне значенню розподілу Стюдента; $c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1} .

Розрахункове значення критерію t_i порівнювалося з критичним і при $|t| \leq [t(f_2)]$ i -й коефіцієнт регресії вважався незначним.

Кількість повторних дослідів в кожній точці плану експерименту знаходилася за формулою [140]:

Таблиця 4.7 Матриця планування експерименту

№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	0
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	0
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,86825
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	0,1124
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	0,0143
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,00935
9	+1	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	0
10	+1	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	0,4148
11	+1	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0,1144
12	+1	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0,6214
13	+1	0	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	1,0464
14	+1	0	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0,1155
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4241
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4066
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4492
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4116
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4206
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4189
b_i	0	0,050055	0	-0,008049	1,716E-07	-4,762E-05	-1,639E-08	-3,658E-04	-1,668E-11	1,523E-05	
t	0	43,70537	0	41,50968	21,00331	18,65622	11,84706	24,26643	3,767962	35,24397	$[t]=2,571$

$$n \geq \frac{1+\beta+2n_{\text{відк}}}{1-\beta}, \quad (4.14)$$

де β – довірна ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах; $n_{\text{відк}}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно рекомендацій авторів робіт [140], [141] довірна ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок виміральної техніки вибирається в межах (0,8...0,9), тоді при $n_{\text{відк}}=0$

$$n \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} = 9...19. \quad (4.15)$$

В табл. 4.5 наведено матрицю планування експерименту для функції відгуку – відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії після відкидання факторів із незначимими коефіцієнтами регресії для функції відгуку – відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів згідно проведеного багатфакторного експерименту має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta V = & 0,0506W^{0,7306} - 0,00805W^{1,155} + 1,716 \cdot 10^{-7}W^{0,7306} \\ & \cdot t^{2,282} - 4,762 \cdot 10^{-5}W^{0,7306}E^{1,155} - 1,639 \cdot 10^{-8}t^{2,282} \cdot \\ & \cdot E^{1,155} - 3,658 \cdot 10^{-4}W^{1,4612} - 1,6 \cdot 10^{-11}t^{4,564} + 1,523 \cdot \\ & \cdot 10^{-5}E^{2,31} [\%]. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Від'ємний результат, отриманий за допомогою регресійної моделі (4.16), слід сприймати як нульовий, тобто руйнування конструкційного матеріалу під дією ультразвукової кавітації не відбувається.

За критерієм Стюдента виявились значимими усі фактори, крім вільного члена b_0 та x_2 , ефектів взаємодії 1-го порядку та квадратичних ефектів.

При цьому $S_{\text{відт}}^2 = 0,0002202$; $S_{\text{ад}}^2 = 0,0003654$; $F = 1,659 < [F] = 4,784$.

Отже за критерієм Фішера гіпотезу про адекватність регресійної моделі (4.14) можна вважати правильною з 95%-ю достовірністю. Коефіцієнт кореляції склав $R=0,951$, що свідчить про високу точність одержаних результатів.

Як видно із табл. 4.7, за критерієм Стюдента серед досліджених параметрів найбільше на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів впливає Модуль Юнга матеріалу, а найменше – тривалість кавітації.

На рис. 4.10 показано поверхні відгуків цільової функції – відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно проілюструвати залежність даної цільової функції від окремих параметрів впливу.

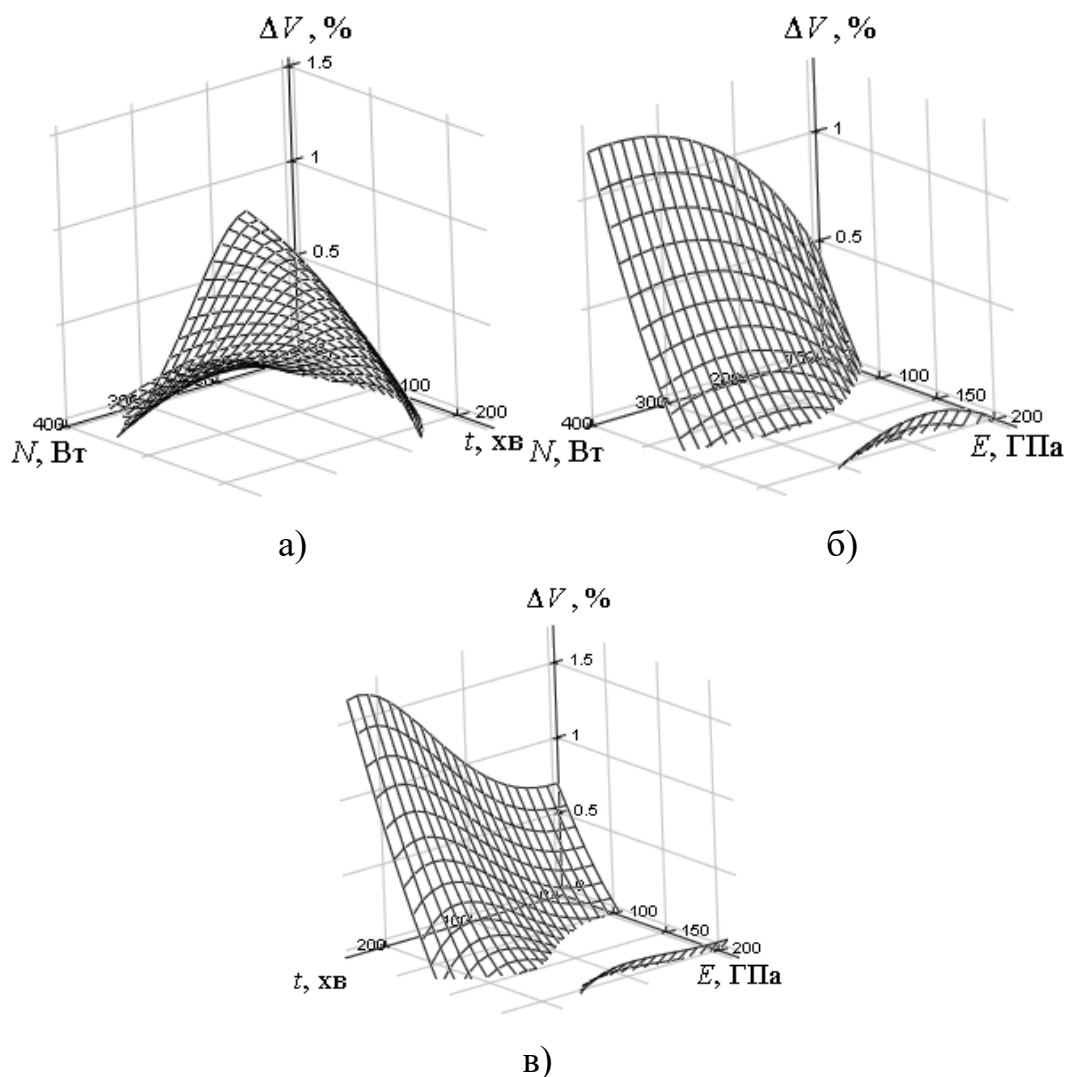


Рис. 4.10. Поверхні відгуків цільової функції – відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу: а) $\Delta V = f(N, t)$; б) $\Delta V = f(N, E)$; в) $\Delta V = f(t, E)$

4.2 Дослідження впливу статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації

Ефективний спосіб підвищення інтенсивності кавітаційного впливу в звуковому полі запропонували Агранат Б.А., Башкіров В.І., Израїлович Я.І., Китайгородский Ю.І. і Кутузов А.В. [142]. Авторами розроблений метод інтенсифікації ультразвукової кавітації шляхом одночасного підвищення інтенсивності ультразвуку за рахунок збільшення амплітуди коливань випромінюючого перетворювача і збільшення статичного тиску в рідині.

Представлене авторами експериментальне підтвердження запропонованого методу [143]–[147] показує, що при збільшенні статичного тиску до рівня 0.4 ... 0.5 від звукового тиску кавітаційна ерозія посилюється в 20 ... 30 разів. Інтенсифікацію кавітаційного впливу при підвищенні надлишкового статичного тиску автори пояснюють тим, що зі збільшенням статичного тиску зменшується мінімальний радіус R_{\min} , що досягається бульбашкою при стисненні. Зменшення R_{\min} в кінцевій стадії стиснення значно збільшує дію сил поверхневого натягу, що сприяє підвищенню радіальної швидкості руху стінки порожнини в момент її сплескування. У напівперіод розтягування при підвищеному статичному тиску зменшується величина максимального радіуса бульбашки R_{\max} . Однак, зниження інтенсивності, викликане зменшенням R_{\max} , з надлишком компенсується підвищенням інтенсивності через зменшення R_{\min} [69].

Підвищення інтенсивності ультразвукової кавітації (числа кавітації) шляхом зміни статичного тиску має нелінійний характер. Саме цей факт вимагає проведення додаткового дослідження.

Для досягнення високої ефективності технологічного обладнання, що реалізує ультразвукову кавітаційну обробку, необхідно розуміння особливостей утворення звукового поля в технологічному об'ємі при різних рівнях інтенсивності ультразвукових коливань. Для створення технологічного кавітаційного обладнання важлива інформація про форму та ерозійну

активність кавітаційної області, а також вплив на режим кавітації статичного тиску.

Для уточнення даних щодо впливу підвищеного і пониженого тиску на процес протікання ультразвукової кавітації була розроблена експериментальна установка, схема якої представлена на рис. 4.11.

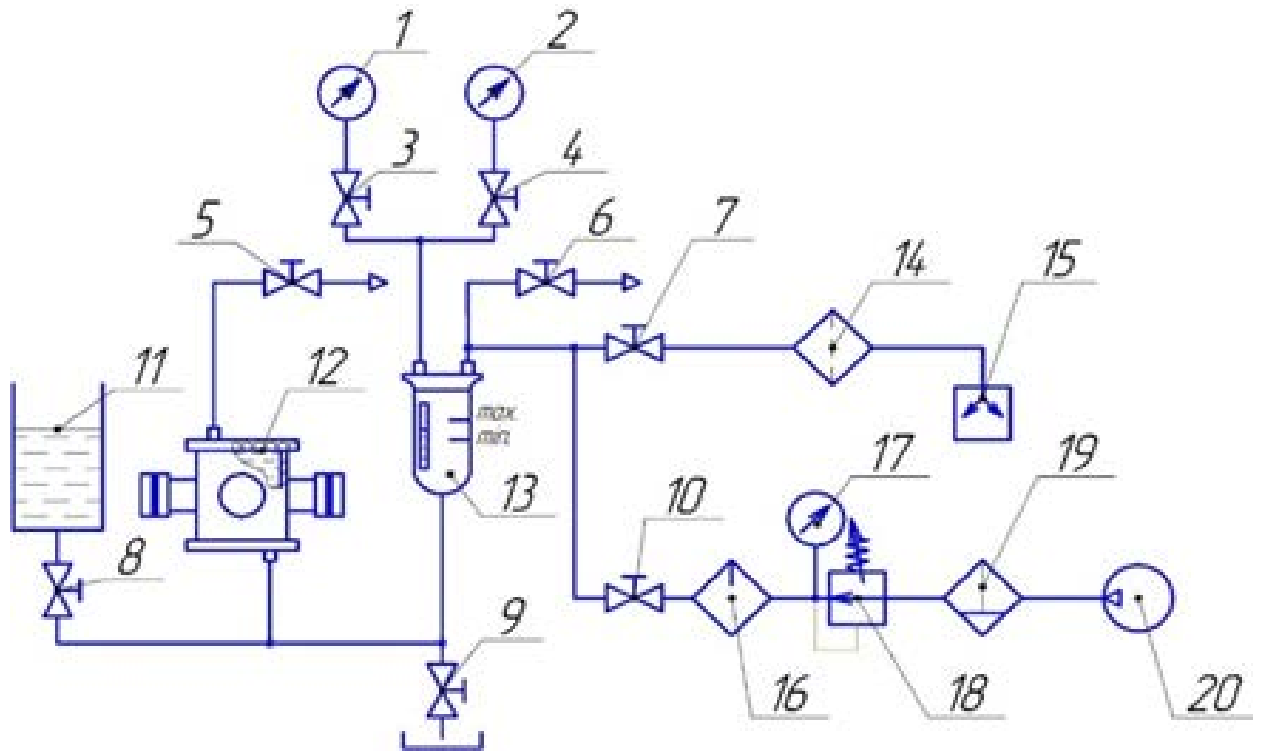


Рис. 4.11. Схема експериментального стенду для дослідження впливу статичного тиску на особливості ультразвукової кавітації. (1-манометр, 2-вакуумметр; 3-10-крани, 11-резервуар для робочої рідини, 12-ультразвуковий трубчастий вібратор, 13 - ємність контролю рівня заповнення; 14-фільтр, 15-вакуумний насос, 16-19-блок підготовки стисненого повітря, 20-компресор)

Установка дозволяє проводити дослідження як при підвищенні робочого тиску за допомогою компресора 20, так і при зниженні його нижче атмосферного завдяки вакуумному насосу 15. Всі елементи з'єднані між собою мідними трубками, що запобігає їх деформації при зміні статичного тиску. Додаткова ємність 13 розташована на одному рівні з резервуаром 11 і одночасно знаходиться вище ультразвукового трубчастого вібратора 12. Це дозволяє повністю заповнити робочу камеру рідиною і запобігти потраплянню бульбашок повітря всередину. При такому розташуванні всередині ємності 13 утворюється замкнута повітряна порожнина, яка дозволяє контролювати рівень заповнення

установки робочою рідиною і запобігає її потраплянню в вимірювальні прилади 1, 2 і пневматичну апаратуру 15-20. У схемі задіяний додатковий фільтр 14, який захищає вакуумний насос від випадкового крапельного попадання рідини.

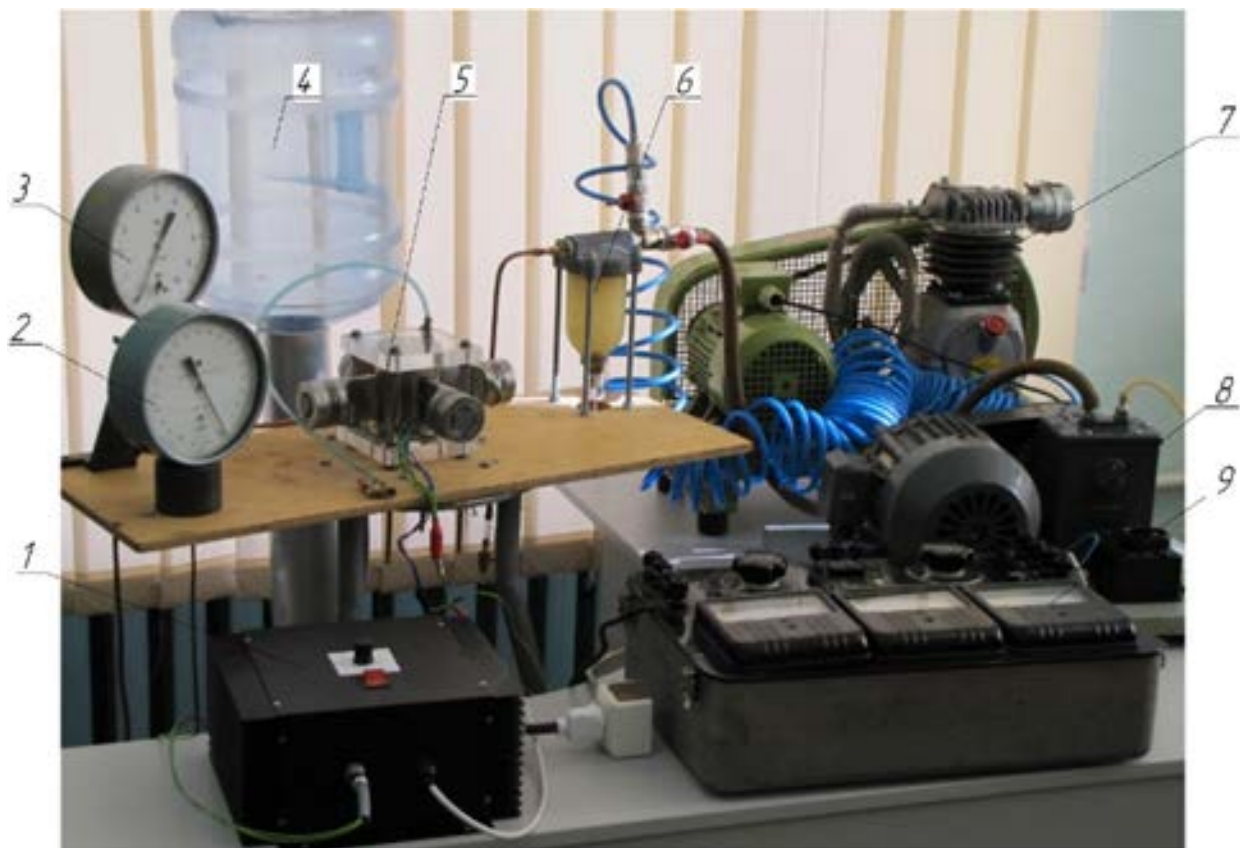


Рис. 4.12. Загальний вигляд експериментального стенду (1 - блок електроніки, 2 - вакуумметр, 3 - манометр, 4 - бак, 5 - кавітатор, 6 - ємність контролю рівня заповнення, 7-компресор, 8-вакуумнасос, 9 - вимірювальна станція)

Загальний вигляд випробувального стенду представлений на рис. 4.12.

Для експериментального підтвердження впливу статичного тиску на інтенсивність кавітаційних процесів було проведено дві серії експериментів. Одна серія була присвячена дослідженню інтенсивності кавітаційної ерозії при підвищенні надлишкового тиску, а друга - при зниженні тиску нижче атмосферного. При цьому звуковий тиск, температура, частота коливань, тривалість обробки і характеристики рідини підтримувалися постійними. В якості тестових зразків в експериментах була обрана алюмінієва фольга.

В якості робочої рідини використовувалася вода при температурі 293К. Кожен зразок піддавався озвучуванню ультразвуковим випроміненням протягом

10 сек. Час визначався за допомогою таймера, який сигналізував про закінчення кожного окремого експерименту. Резонансну частоту коливань в 22.4 кГц автоматично підтримувала електронна система керування. В ході експериментів було виявлено, що частинки ерозійно зруйнованої фольги, які залишаються на стінках камери, при проведенні наступного експерименту виступають в якості абразивних включень, кількість зародків кавітації в об'ємі камери не є постійними. Тому робоча рідина при кожному експерименті замінювалася, а стінки трубчастого вібратора ретельно очищувалися від різного роду механічних забруднень.

Усередині камери ультразвукового трубчастого вібратора уздовж його вертикальної осі розміщувалася тестова алюмінієва фольга, яка закріплювалася на спеціальній рамці. Фольга після повного заповнення камери водою була піддана ультразвуковому озвученню при різних значеннях статичного тиску, створюваного за допомогою компресорної установки (в разі підвищення статичного тиску) і за допомогою вакуумного насоса (при розрідженні). Під час експерименту надлишковий тиск змінювався в межах 0 ... 0,3 МПа з кроком 0,05 МПа, а зменшення тиску відбувалося в межах 0,095 ... 0,065 МПа з кроком 0,01 МПа. Споживана потужність ультразвукового генератора підтримувалася постійною на рівні 200 Вт. При подальшому зниженні тиску кавітаційної ерозії не спостерігалось. Кожен експеримент з тестової фольгою дублювався три рази. Отримані зразки були оцифровані і переведені в графічний вигляд. Для

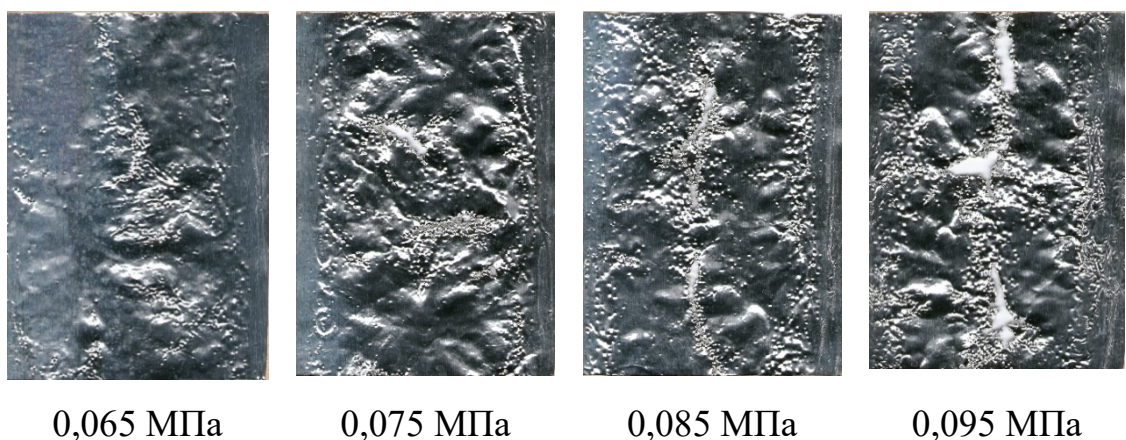


Рис. 4.13. Зміна площі кавітаційного руйнування тестової фольги при різних рівнях пониженого тиску

визначення зруйнованої площі використовувався пакет програм MATLAB. Визначення площі руйнування відбувалося за рахунок розрахунку кількості світлих та темних пікселів у оцифрованому зображенні. Для підтвердження достовірності визначення площі був використаний пакет програми Photoshop

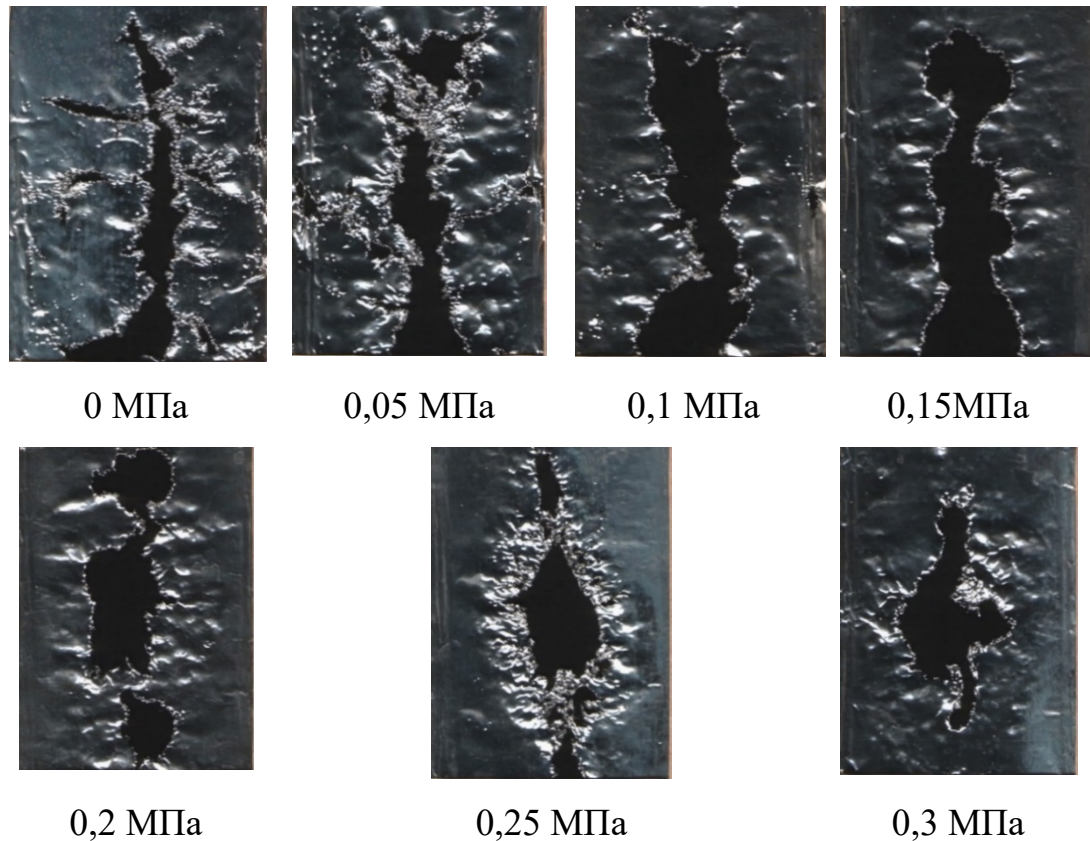


Рис. 4.14. Зміна площі кавітаційного руйнування тестової фольги при різних рівнях надлишкового тиску

CS6 portable. Відмінність між автоматичним розрахунком пакета MATLAB і ручним визначенням за допомогою гістограми зображення в Photoshop CS6 portable склала 1-2%.

Оброблені і усереднені результати проведеного експериментального дослідження були представлені у вигляді графічної залежності площі ерозійного руйнування алюмінієвої тестової фольги від зміни статичного тиску на рис. 4.15.

Експериментальним шляхом доведено вплив статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації. Показано зміну ерозійної активності кавітації при зміні статичного тиску в межах 0,065 ... 0 МПа і 0 ... 0,3 МПа щодо атмосферного.

Нелінійність зміни інтенсивності кавітаційних явищ можна пояснити тим, що внутрішній надлишковий тиск навантажує одностороннім зусиллям трубчастий вібратор, що здійснює радіальні коливання. Що при постійній підведеній потужності призводить до зменшення амплітуди коливань і, відповідно, до зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі, випромінюваної всередину кавітаційної камери. Цю ситуацію можна розглядати як вплив конструктивних особливостей кавітаційної камери на інтенсивність кавітаційних процесів при зміні статичного тиску.

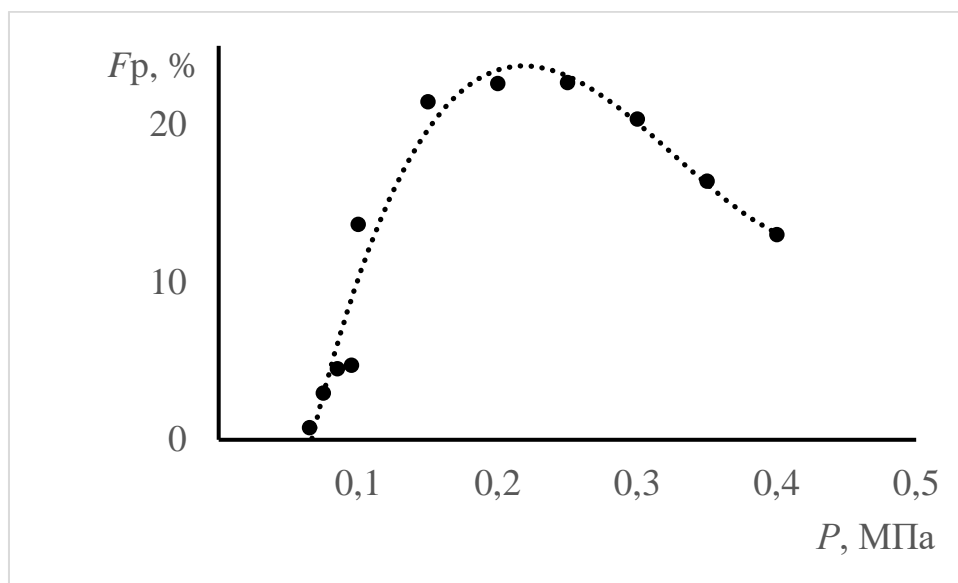


Рис. 4.15. Залежність площі ерозійного руйнування алюмінієвої фольги від зміни статичного тиску

Крім того, інтенсивність кавітаційної ерозії пов'язана з числом кавітації, яке враховує співвідношення статичного тиску і звукового тиску в кавітаційній камері і виражається залежністю [68]:

$$k = \frac{p_0 - p_n}{p_a}, \quad (4.17)$$

де p_n - тиск насиченої пари; p_a - амплітудне значення звукового тиску; p_0 - статичний тиск середовища.

Таким чином, при розробці кавітаційних камер для технологічних процесів необхідно враховувати як конструктивні параметри кавітаційного обладнання, так і число кавітації, пов'язане з співвідношенням статичного і звукового тиску.

4.2 Дослідження впливу розташування фільтрувальної перегородки на стоячу хвилю

Створення ультразвукової кавітації в технологічному об'ємі можливо з утворенням стоячої або рухомої ультразвукової хвилі. У фізиці стояча хвиля [148], також відома як нерухома хвиля, - це хвиля, яка коливається в часі, але профіль амплітуди не поширюється в просторі. Пікова амплітуда коливань хвилі в будь-якій точці простору є постійною з часом, а коливання в різних точках по всій хвилі знаходяться у фазі. Особливістю такої хвилі є утворення в ній вузлів, де амплітуда дорівнює нулю, та пучностей з максимальною амплітудою. При утворенні стоячої хвилі положення вузлів та пучностей лишається незмінним у просторі. Стояча хвиля утворюється внаслідок накладання двох рухомих хвиль, такі хвилі повинні рухатися назустріч одна одній та мати незначний зсув фази. У рухомій хвилі енергія переноситься у всьому об'ємі, а в стоячій хвилі через площини, де розташовані вузли, енергія не перетікає.

Для створення ультразвукового кавітаційного фільтру необхідно дослідити механізм утворення стоячої хвилі та дослідити оптимальне місце розташування фільтрувальної перегородки в ультразвуковому кавітаційному середовищі при утворенні в ньому стоячої хвилі.

Математично було розраховано, що для отримання повздовжніх, майже поршневих коливань, діаметр концентратора (d_k) і діаметр випромінювача (d_v) повинні бути меншими половини довжини хвилі (λ) в рідині (λ_p) і по довжині випромінювача (λ_v) відповідно $d_k < 1/2\lambda_p$, $d_v < 1/2\lambda_v$.

Якщо ж ці розміри не врахувати, тобто приймати $d_k > 1/2\lambda_p$, $d_v > 1/2\lambda_v$, то коливання матимуть боковий напрям (розсіяння), за таких умов хвилі будуть розходитися в різні боки, втрачаючи інтенсивність. При цьому в осьовому напрямку ми отримаємо лише проекції швидкостей (їх складові). Загалом це призводить до втрати ККД випромінювача.

Також за теоретичними даними на поверхні випромінення повинен бути максимум швидкості, а на дні концентратора мінімум. Але тоді виникало питання: «як відбувається відбиття хвилі від торцевої донної поверхні?»

Для вирішення поставленої задачі та підтвердження математичних розрахунків були збудовані стенди для експериментального дослідження реальної картини проходження ультразвукової хвилі крізь різні рідини (зокрема: вода, бензин, дизпаливо).

Спочатку досліди проводилися із залученням ультразвукового випромінювача з діаметром поверхні випромінювача меншим за довжину цілої хвилі та діаметром кавітаційної камери, що дорівнює 75мм. Попередньо виміряна довжина хвилі на частоті 26 кГц у бензині становила $\lambda = 33$ мм.

Відстань від поверхні випромінювання, яка розташована у верхній частині стакану, до донної поверхні становила

$$\begin{aligned} L1 &= n \cdot \lambda = 2 \cdot 33 = 66 \text{ мм}; \\ L2 &= n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 2 \cdot 33 - 33 / 4 = 58 \text{ мм}; \\ L3 &= n \cdot \lambda + \lambda / 4 = 2 \cdot 33 + 33 / 4 = 74 \text{ мм}. \end{aligned} \tag{4.18}$$

Кількість півхвиль $n = 2$.

Для визначення пучностей тиску в рідині використовувалася п'єзокерамічний гідрофон. Ми дослідили та довели, що довжина хвилі не відповідала розрахунковій довжині (рис. 4.16) тому що, ми мали справу лише з проекцією швидкості.

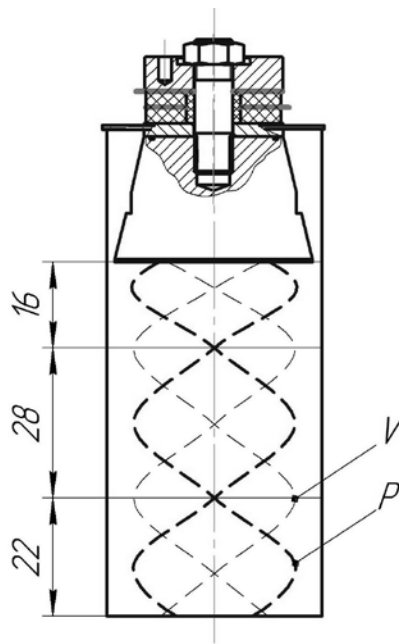
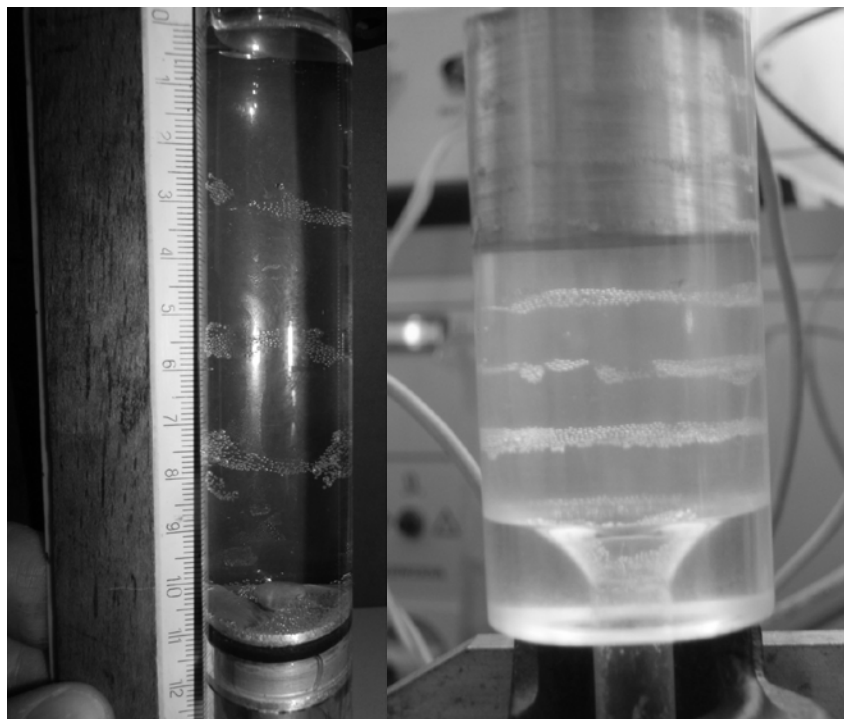


Рис. 4.16. Експериментально виміряні довжини хвиль швидкості (V) і тиску (P) у бензині

Коли всі розміри було витримано, а всі діаметри і довжини відповідали математичним умовам, було отримано повне співпадіння місць розташування вузлів та пучностей з розрахунковими значеннями (рис. 4.17).



а)

б)

Рис. 4.17. Розташування кавітаційних прошарків в циліндричній камері (а) та гідравлічному трансформаторі (б)

Було встановлено, що для чіткого встановлення хвилі, потрібно щоб було парне число четвертей хвилі по довжині кавітаційної камери. Також дослідили, що для відбиття хвилі на донній торцевій поверхні камери повинен бути мінімум швидкості звуку та максимум хвилі тиску.

Попередньо виміряна довжина хвилі води на частоті 35 КГц становила $\lambda = 32$ мм.

Відстані від перетворювача, розміщеного у верхній частині циліндричної камери, до донної поверхні становлять:

$$\begin{aligned} L1 &= n \cdot \lambda = 4 \cdot 32 = 128 \text{ мм}; \\ L2 &= n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 4 \cdot 32 - 32 / 4 = 120 \text{ мм}; \\ L3 &= n \cdot \lambda + \lambda / 4 = 4 \cdot 32 + 32 / 4 = 136 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Кількість півхвиль $n = 4$.

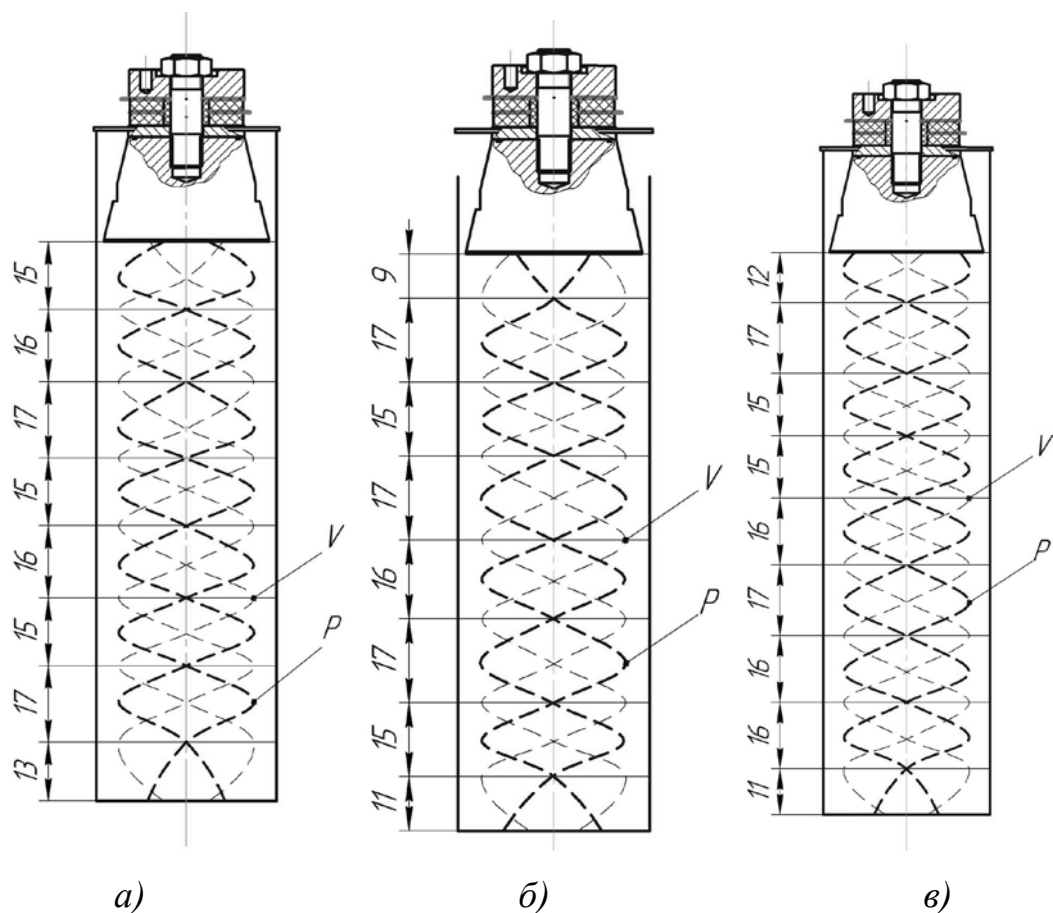


Рис. 4.18. Експериментально виміряні довжини хвиль швидкості (V) і тиску (P) у воді для відстаней: а) $L1 = n \cdot \lambda = 4 \cdot 32 = 128$ мм, б) $L2 = n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 4 \cdot 32 - 32 / 4 = 120$ мм, в) $L3 = n \cdot \lambda + \lambda / 4 = 4 \cdot 32 + 32 / 4 = 136$ мм.

Усереднені результати вимірювань відстаней від поверхні випромінювання до першого «0» та від останнього «0» до донної поверхні стакана наведені на рисунках (рис. 4.18) та (рис. 4.19). Наявність кавітації абсолютно не зміщує положення «0», лише робить їх менш вираженими, менш чіткими.

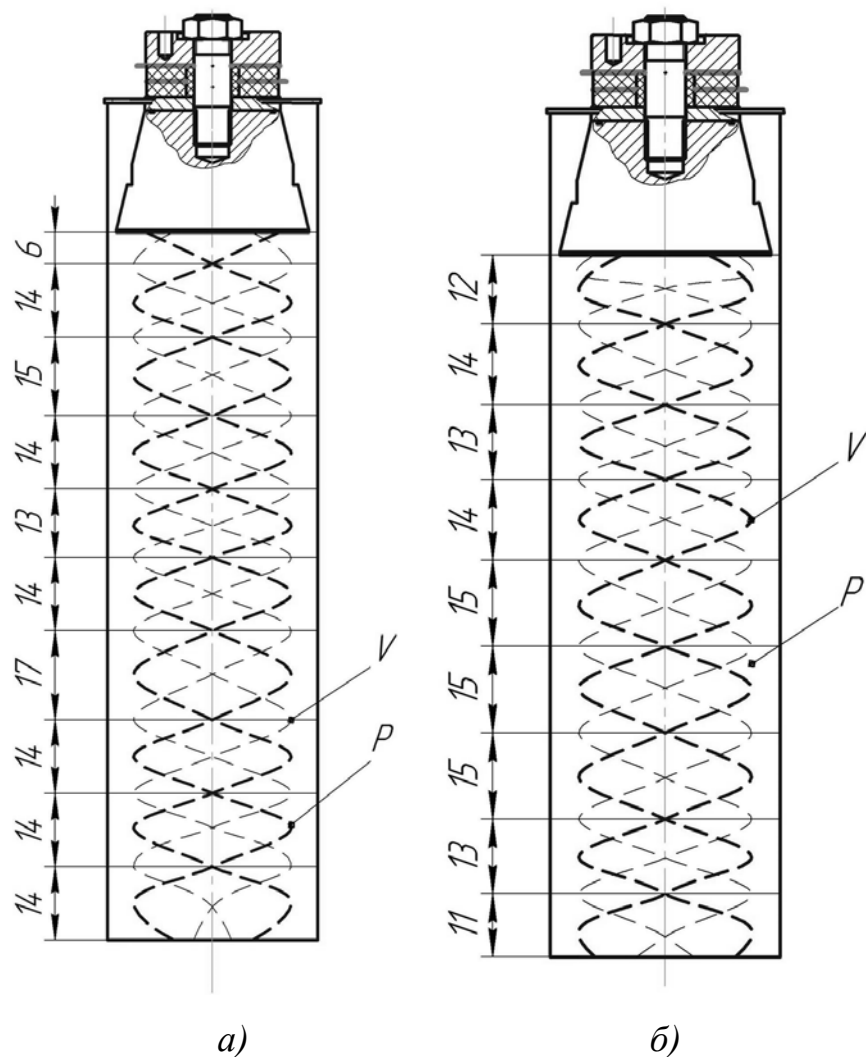


Рис. 4.19. Експериментально виміряні довжини хвиль швидкості (V) і тиску (P) у бензині для відстаней: а) $L1 = n \cdot \lambda = 4 \cdot 34 = 136$ мм, б) $L2 = n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 4 \cdot 34 - 34 / 4 = 127,5$ мм

На рис.4.20 показано на прикладі тестової алюмінієвої фольги результати експериментальної перевірки ерозійної активності в вузлах та в пучностях плоскої хвилі, що встановилася.

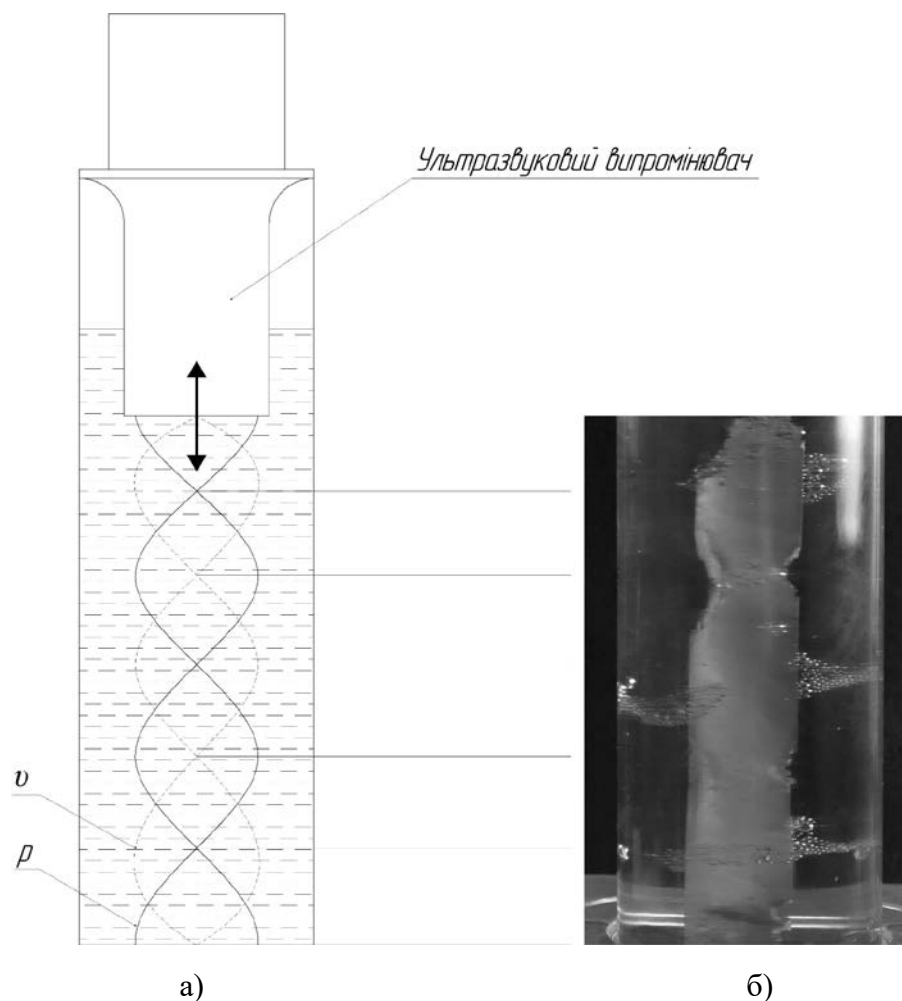


Рис. 4.20. Схема розміщення ультразвукового поля плоскої стоячої хвилі (а) і фотографія кавітаційної ерозії тестової алюмінієвої фольги в місцях, відповідних пучностям тиску (б)

Фільтрувальну перегородку в ультразвуковому полі можна розташувати в двох місцях - в пучності або в вузлі. Для визначення оптимального положення було виготовлено стенд, представлений на рис. 4.21. Установка представляє собою скляну трубу, обмежену кришками з поліметилакрилату. На верхній кришці труби розміщено ультразвуковий випромінювач 2 потужністю 50 Вт. В скляній трубі розміщено фільтрувальну перегородку 4, яка виконана з, поглинаючого пружні коливання, матеріалу – фторопласту або з, відбиваючого пружні коливання, матеріалу – металевої сітки. Експериментальний стенд передбачає можливість розміщення фільтрувальної перегородки в вузлі або в пучності ультразвукових коливань. Через штуцер 3 відбувається нагнітання рідини у установку, а через штуцер 7 її відвід. Дослідження проводились при

атмосферному тиску. Для визначення інтенсивності ультразвукової кавітації в тестовому середовищі, в центрі скляної труби стенду розміщували тестову фольгу, по площі руйнування якої визначалася інтенсивність кавітаційної ерозії (рис. 4.20). Озвучування кавітаційного середовища виконувалося на протязі 5 секунд.

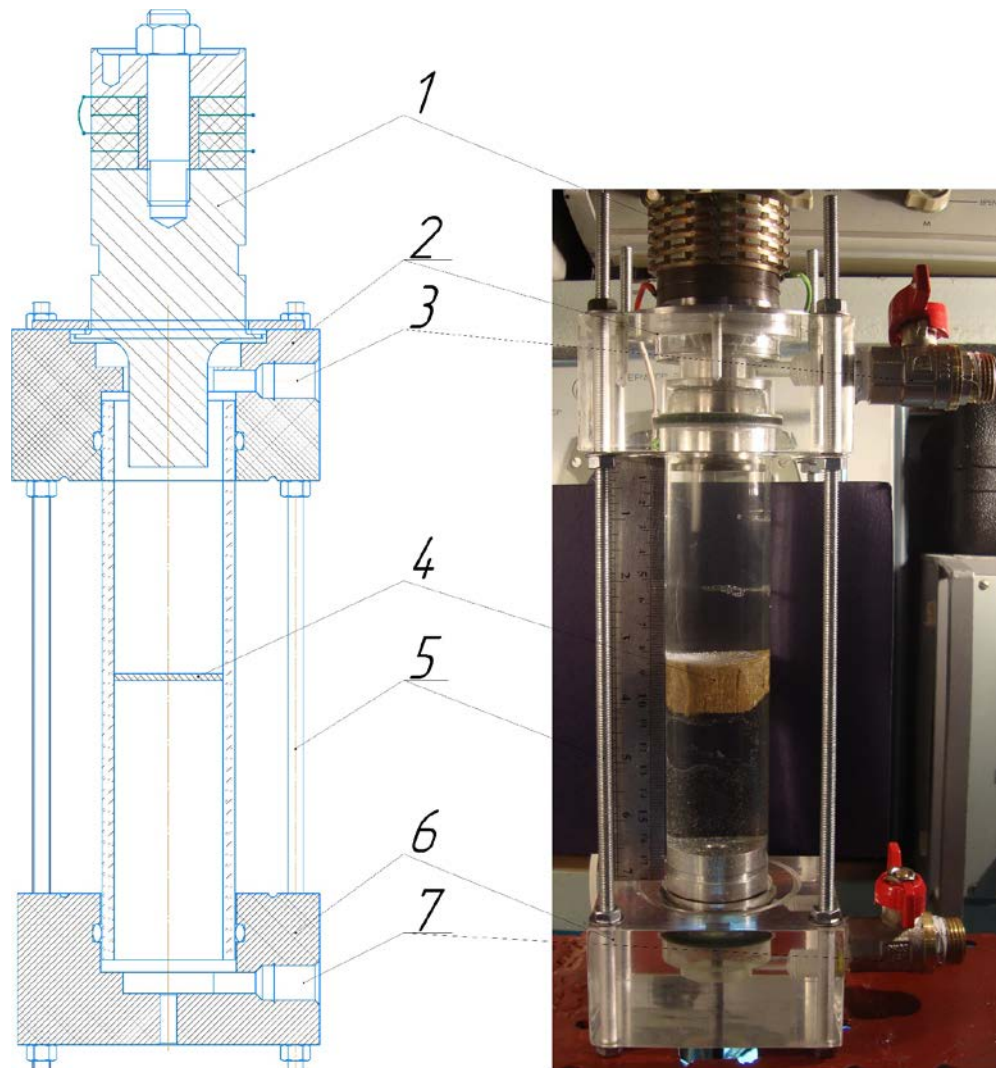


Рис. 4.21. Схема стенду для визначення оптимального місцеположення фільтрувальної перегородки. (1 – ультразвуковий кавітаційний випромінювач; 2 – кришка верхня; 3 – відвід рідини; 4 – випробувана перегородка; 5 – шпилька кріплення; 6 – кришка нижня; 7 – підвід рідини)

В результаті було встановлено, що розташовувати фільтрувальну перегородку доцільно не далі ніж 1,5 довжини хвилі від поверхні випромінювання. При цьому спостерігалась максимальна ефективність кавітаційної ерозії тестової фольги (рис.4.20). Фторопласт Ф4 має поглинаючу поверхню і на його поверхні у будь-якому випадку буде мінімум швидкості та

максимум тиску, тобто вузол стоячої хвилі. Відлік вузлів та пучностей стоячої хвилі завжди починався з поверхні фторопластової перегородки.

Загальні висновки

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

- За результатами аналізу основних способів очищення рідин методом фільтрування, встановлено, що актуальною задачею є збільшення інтервалу між обслуговуванням фільтрів, яка може бути вирішена шляхом очищення фільтрувальної перегородки за рахунок введення ультразвукової енергії в зону фільтрування, що потребує уточнення фізичної і математичної моделі взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні, в яких має бути враховано надзвукові швидкості руху частинок забруднювача.

- За результатами комп'ютерного дослідження росту парогазової бульбашки в ультразвуковому середовищі отримано показники швидкості руху частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки колапсуючої кавітаційної бульбашки, отримані результати засвідчують можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

- Визначено, шляхом математичного моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтрувальною перегородкою, залежності зношення конструкційних матеріалів у часі під впливом ультразвукової кавітації поверхонь з фторопласту Ф4 та сталі 12Х18Н10Т. Встановлено, що сталь 12Х18Н10Т вдвічі менше піддається впливу кавітаційної ерозії у порівнянні з фторопластом Ф4, та, за результатами експериментального дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів, встановлено, що модуль Юнга матеріалу має суттєво більший вплив на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів ніж тривалість кавітаційного впливу, тобто 12Х18Н10Т є доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах.

- За результатами експериментального дослідження встановлено залежність надлишкового та вакууметричного тиску в кавітаційній камері від інтенсивності ультразвукової кавітації та визначено, що максимальна інтенсивність кавітаційного впливу припадає на інтервал тиску 0,2...0,3 МПа. Експериментально визначено раціональні параметри розташування фільтрувальної перегородки відносно ультразвукової хвилі в кавітаційній камері.

- Запропонована інженерна методика розрахунку резонансних елементів конструкції корпусу фільтра та приводів-випромінювачів, застосування якої передбачає врахування умов експлуатації, характеристик конструкційних матеріалів та марки п'єзоелектричних перетворювачів, що в сукупності забезпечує збільшення безперервної роботи фільтроелементу. На основі методики розроблені та впровадженні конструкції ультразвукових фільтрів для технологічних процесів згущення цикорію та очищення соняшникової олії, які забезпечили досягнення в середньому 45% збільшення часу безперервної роботи фільтрувального обладнання на виробництві.

-

Список використаних джерел

- [1] О. Р. Светлова, “Разработка комплексных методов очистки жидких сред от твёрдой фазы в технологии получения продуктов переработки целлюлозы,” Бийск, 2007.
- [2] И. Н. Лозановская, Д. С. Орлов, и Л. К. Садовников, *Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении*. Москва: Высшая школа, 1998.
- [3] Г. И. Морозова и Р. А. Новикова, *Глобальная экологическая проблема*. Москва: Мысль, 1988.
- [4] M. J. Brandt, K. M. Johnson, A. J. Elphinston, and D. D. Ratnayaka, “Water Filtration,” in *Twort’s Water Supply*, 2017.
- [5] В. А. Проскуряков и Л. И. Шмидт, *Очистка сточных вод в химической промышленности*. Ленинград: Химия, 1977.
- [6] Т. А. Малиновская, И. А. Кобринский, О. С. Кирсанов, и В. В. Рейнфарт, *Разделение суспензий в химической промышленности*. Москва: Химия, 1983.
- [7] В. С. Мельникова, В. Г. Калюжнов, Л. К. Дегтярева, и В. А. Микишев, “Очистка сточных вод полистирола методом напорной флотации,” *Пластические массы*, № 5, с. 41–43, 1996.
- [8] Т. П. Устинова и Е. И. Титаренко, “Об эффективности локальных установок очистки производственных сточных вод,” *Хим. промышленность*, № 2, с. 20–25, 2001.
- [9] В. А. Жужиков, *Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий*. Москва: Химия, 1980.
- [10] M. Mullett, R. Fornarelli, and D. Ralph, “Nanofiltration of mine water: Impact of feed pH and membrane charge on resource recovery and water discharge,” *Membranes (Basel)*., 2014.
- [11] В. И. Соколов, *Центрифугирование*. Москва: Химия, 1976.
- [12] S. Verma, B. Prasad, and I. M. Mishra, “Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics,” *J. Hazard. Mater.*, 2010.

- [13] H. Heinz, “Anwendung von flockungsmitteln bei der abwasser-reinigung,” *Seifen-Öle-Fette-Wache*, vol. 144, no. 11–12, pp. 447–455, 1988.
- [14] J. Rubio, M. L. Souza, and R. W. Smith, “Overview of flotation as a wastewater treatment technique,” *Miner. Eng.*, 2002.
- [15] В. А. Коваленко и А. А. Ильинский, *Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений*. Москва: Химия, 1982.
- [16] P. J. Bailes and M. Watson, “Electrostatic and centrifugal separation of liquid dispersions,” 9021756.3 (GB), 1992.
- [17] V. K. Gupta, I. Ali, T. A. Saleh, A. Nayak, and S. Agarwal, “Chemical treatment technologies for waste-water recycling - An overview,” *RSC Advances*. 2012.
- [18] R. Smith, *Chemical Process Design and Integration*. 2005.
- [19] O. Sahu and P. Chaudhari, “Review on Chemical treatment of Industrial Waste Water,” *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, 2013.
- [20] J. P. Chen, S.-Y. Chang, J. Y. C. Huang, E. R. Bauman, and Y.-T. Hung, “Gravity Filtration,” in *Physicochemical Treatment Processes*, 2005.
- [21] C. M. Todaro, “Centrifugation,” in *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment: Third Edition*, 2014.
- [22] A. Cambiella, J. M. Benito, C. Pazos, and J. Coca, “Centrifugal separation efficiency in the treatment of waste emulsified oils,” *Chem. Eng. Res. Des.*, 2006.
- [23] H. Anlauf, “Recent developments in centrifuge technology,” *Sep. Purif. Technol.*, 2007.
- [24] R. R. Bhave, “Cross-Flow Filtration,” in *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment: Third Edition*, 2014.
- [25] N. F. Gray, “Filtration Methods,” in *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks: Second Edition*, 2013.
- [26] Š. Schlosser, “Membrane filtration,” in *Engineering Aspects of Food Biotechnology*, 2013.
- [27] P. R. Johnston, “Liquid filtration,” *Chem. Eng. Prog.*, 1988.
- [28] Г. И. Берестюк, *Регенерация фильтров для разделения суспензий*. Москва:

Химия, 1978.

- [29] И. А. Димитриева и И. А. Михайловская, *Физико-механические испытания химических волокон*. Москва: Высшая школа, 1970.
- [30] И. А. Рафиенко, *Фильтрование рудных пульп на синтетических фильтротканях*. Москва: Недра, 1967.
- [31] И. К. Скобеев, *Фильтрующие материалы*. Москва: Недра, 1978.
- [32] N. Savage and M. S. Diallo, “Nanomaterials and water purification: Opportunities and challenges,” in *Journal of Nanoparticle Research*, 2005.
- [33] Т. А. Малиновская, *Разделение суспензий в промышленности органического синтеза*. Москва: Химия, 1971.
- [34] Р. И. Нигматулин, *Динамика многофазных сред. Часть 1*. Москва: Наука, 1987.
- [35] Г. Уоллис, *Одномерные двухфазные течения*. Москва: Мир, 1972.
- [36] С. Соу, *Гидродинамика многофазных систем*. Москва: Мир, 1971.
- [37] В. М. Ентов, “Теория фильтрации,” *Соросовский образовательный журнал*, № 2, с. 121–128, 1998.
- [38] Я. И. Френкель, *Кинетическая теория жидкостей*. Ленинград: Наука, 1975.
- [39] Л. С. Лейбензон, *Движение природных жидкостей и газов в пористой среде*. Москва: ОГИЗ. Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1947.
- [40] A. Al-Amoudi and R. W. Lovitt, “Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency,” *J. Memb. Sci.*, pp. 4–28, 2007.
- [41] C. Regula *et al.*, “Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review,” *Water Res.*, vol. 56, no. 1, pp. 325–365, 2014.
- [42] N. Porcelli and S. Judd, “Chemical cleaning of potable water membranes: A review,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 44, no. 5, pp. 1389–1398, 2010.
- [43] K. Wegener *et al.*, “Fluid elements in machine tools,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 611–634, 2017.
- [44] О. Ф. Луговський, А. І. Зілінський, А. В. Шульга, та І. А. Гришко,

“Можливості регенерації фільтруючих перегородок,” *Mech. Adv. Technol.*, № 89, с. 55–64, 2020.

- [45] *Commercial Aircraft Hydraulic Systems*. 2016.
- [46] Л. М. Блянкман, В. Г. Пономарев, и Н. Л. Смирнова, *Очистка фильтрующих материалов / 2-е издание*. Москва: Энергоиздат, 1982.
- [47] П. Н. Беянин и Ж. С. Черненко, *Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем*. Москва: Машиностроение, 1964.
- [48] В. М. Коновалов, В. Я. Скрицкий, и В. А. Рокшевский, *Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков*. Москва: Машиностроение, 1976.
- [49] И. В. Стельмах, “Автоматизация процесса очистки фильтров станочных гидроприводов на базе электрогидравлического импульсного устройства,” *Вестник Саратовского государственного технического университета*, № 30, с. 62–67, 2008.
- [50] В. М. Фридман, *Ультразвуковая химическая аппаратура*. Москва: Машиностроение, 1967.
- [51] В. М. Комаров, “Устройство для промывки фильтроэлемента,” 1519755, 1989.
- [52] А. Ф. Луговской и Н. В. Чухраев, *Ультразвуковая кавитация в современных технологиях*. Киев, 2007.
- [53] С. М. Епоян, Д. Г. Сухоруков, и Т. С. Айрапетян, “Спосіб регенерації пористих перегородок горизонтального відстійника,” 95962, 2015.
- [54] О. Д. Солодкий та В. О. Солодкий, “Багатоступеневий конусний трубопровідний фільтр-сепаратор,” 111202, 2015.
- [55] Г. С. Пантелят, А. А. Сироватський, та Т. С. Эпоян, “Спосіб регенерації катіонітових фільтрів з подальшою обробкою регенерату,” 64055 А, 2004.
- [56] О. А. Сиротинський, С. О. Білоконь, І. І. Науменко, А. І. Щурок, і С. Л. Форсюк, “Вібраційний фільтр,” 43993, 2002.
- [57] Ю. И. Осипов, В. А. Ермаков, и В. В. Бондарик, “Устройство для очистки фильтров,” 1124487, 1992.
- [58] H. Muramatsu, S. Yanai, Y. Mizushima, and T. Saito, “The relationship between

- bubble motion and particle flocculation pattern under 20-kHz-ultrasound radiation in water,” *Chem. Eng. Sci.*, 2017.
- [59] M. O. Lamminen, H. W. Walker, and L. K. Weavers, “Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes,” *J. Memb. Sci.*, 2004.
- [60] H. M. Kyllönen, P. Pirkonen, and M. Nyström, “Membrane filtration enhanced by ultrasound: A review,” *Desalination*. 2005.
- [61] М. М. . Хасанов, “Эжекторно-ультразвуковой способ очистки поверхности фильтрэлементов,” 2378036, 2010.
- [62] Е. С. Е. Sh., “Ультразвук и его применения,” *Uspekhi Fiz. Nauk*, 1939.
- [63] С. В. Костюченко, “Ультрафиолетовое облучение – современный метод обеззараживания воды,” *Водоснабжение и санитарная техника*, № 12, с. 21–23, 2005.
- [64] F. Reuter, S. Lauterborn, R. Mettin, and W. Lauterborn, “Membrane cleaning with ultrasonically driven bubbles,” *Ultrason. Sonochem.*, № 37, с. 542–560, 2017.
- [65] И. М. Федоткин и И. С. Гулый, *Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть 1*. Киев: Полиграфкнига, 1997.
- [66] О. Ф. Луговський і В. І. Чорний, “Застосування ультразвукових коливань у пристроях фільтрування рідини,” *Вестник Национального технического университета Украины «КПИ»*, № 35, с. 111–119, 1999.
- [67] И. А. Гришко и А. Ф. Луговской, “Возможности применения ультразвуковых колебаний в технологическом процессе инактивации микроорганизмов,” *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта)»*, с. 157–158, 2012.
- [68] И. П. Голямина, Ред., *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*. Москва: Советская энциклопедия, 1979.
- [69] О. Ф. Луговський, А. І. Зілінський, та І. А. Гришко, “Математична модель

- процесу фільтрації в ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності,” *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*, № 74, с. 11–17, 2015.
- [70] О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, І. А. Гришко, А. І. Зілінський, та О. О. Луговський, “Ультразвукове кавітаційне обладнання,” 108589, 2015.
- [71] В. И. Просвирнин и И. П. Назаренко, “Ультразвуковое устройство для фильтрации жидкостей,” 1590099, 1990.
- [72] Г. Б. Горелик, В. И. Коробко, и В. К. Сыркин, “Устройство для отделения дисперсных частиц от потока газа или жидкости,” 1242473, 1996.
- [73] А. Г. Сучков, “Устройство для ультразвуковой обработки жидкостей,” 1819861, 1993.
- [74] Y. Mizushima, Y. Nagami, Y. Nakamura, and T. Saito, “Interaction between acoustic cavitation bubbles and dispersed particles in a kHz-order-ultrasound-irradiated water,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 93, pp. 395–400, 2013.
- [75] B. Niemczewski, “Chemical activation of ultrasonic cavitation,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 6, no. 4, pp. 211–216, 1999.
- [76] N. S. M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, and M. Ashokkumar, “Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 29, pp. 568–576, 2016.
- [77] K. Lugovska, “Environmental safety technology of ultrasonic cavitation cleaning,” *Osteuropa Work. auf dem 22. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum. Uni Kassel Transf. Ost-West-Wissenschaftszentrum, Kassel*, p. 27, 2010.
- [78] О. М. Яхно, Е. А. Луговская, и А. В. Мовчанюк, “Исследование возможностей технологии ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей,” *Вісн. Нац. техн. ун-ту України „Київ. політехн. ін-т” серія „Машинобудування”*, № 58, с. 234–240, 2010.
- [79] В. А. Акуличев, “Гидратация ионов и кавитационная прочность воды,” *Акустический журнал*, № 12, с. 160–166, 1966.
- [80] T. J. Mason, E. Joyce, S. S. Phull, and J. P. Lorimer, “Potential uses of ultrasound in the biological decontamination of water,” in *Ultrasonics Sonochemistry*, 2003.

- [81] H. Xu, J. Tu, F. Niu, and P. Yang, "Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters," *Appl. Acoust.*, vol. 101, pp. 179–184, 2016.
- [82] А. Д. Перник, *Проблемы кавитации*. Ленинград: Судостроение, 1988.
- [83] А. Ф. Луговской, И. А. Гришко, и В. С. Кривошеев, "Ультразвуковая проточная кавитационная установка для повышения эффективности технологических процессов," *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*, № 63, с. 230–232, 2011.
- [84] Г. И. Кувшинов и П. П. Прохоренко, *Акустическая кавитация у твердых поверхностей*. Минск: Навука і техника, 1990.
- [85] Y. Tao, J. Cai, X. Huai, B. Liu, and Z. Guo, "Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment," *Chemical Engineering and Technology*, vol. 39, no. 8. pp. 1363–1376, 2016.
- [86] M. Dular *et al.*, "Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 29, pp. 577–588, 2016.
- [87] Л. В. Марчук, А. Ф. Прокопенко, А. Ф. Луговской, и И. А. Гришко, "Влияние ультразвуковой кавитации на жизнеспособность микроорганизмов," *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна*, № 195, с. 195–206, 2011.
- [88] Л. В. Марчук, А. Ф. Прокопенко, А. Ф. Луговской, и И. А. Гришко, "Повышение эффективности процесса ультразвуковой кавитации при инактивации микроорганизмов," *Вібрації в техніці та технологіях*, v № 63, с. 108–113, 2011.
- [89] А. Ф. Луговской и И. А. Гришко, "Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды," *Промислова гідравліка і пневматика*, № 26, с. 3–6, 2009.
- [90] B. Verhaagen and D. Fernandez Rivas, "Measuring cavitation and its cleaning effect," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 29, pp. 619–628, 2016.
- [91] M. Minnaert, "XVI. *On musical air-bubbles and the sounds of running water*," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, 1933.

- [92] А. Ф. Луговской, А. В. Мочанюк, В. П. Фесич, и И. А. Гришко, “Исследование рабочей зоны высокоамплитудного кавитационного ультразвукового привода,” *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського*, № 49, с. 81–85, 2008.
- [93] Л. Прандтль, *Гидроаэромеханика*. ГИИТЛ, 1949.
- [94] Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, В. А. Докучаева, и А. П. Чернов, “О скорости и энергии абразивной частицы в кавитирующей жидкости./ Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов,” *Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов*, с. 43–59, 1970.
- [95] Б. А. Агранат, *Ультразвуковая техника*. Москва: Высшая школа, 1967.
- [96] Л. Д. Розенберг, *Труды VI всесоюзной акустической конференции, серия Д11*. Изд-во АН СССР, 1968.
- [97] Р. Кнэпп, Д. Дейли, и Ф. Хеммит, *Кавитация*. Москва: Мир, 1974.
- [98] А. И. Зилинский, А. Ф. Луговской, и И. А. Гришко, “Математическая модель процесса фильтрации в ультразвуковом поле повышенной интенсивности,” *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування збірник наукових праць*, № 74, с. 11–17, 2015.
- [99] Л. Д. Ландау и Е. М. Лившиц, *Теория упругости*. Москва: Наука, 1987.
- [100] Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, и С. А. Новиков, *Исследование прочности материалов при динамических нагрузках*. Новосибирск: Наука, 1992.
- [101] Н. . Морозов и Ю. В. Петров, *Проблемы динамики разрушения твердых тел*. Санкт-Петербург: С.-Петербургского университета, 1997.
- [102] Н. А. Кильчевский, *Теория соударений твердых тел*. Киев: Наукова думка, 1969.
- [103] “ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3.” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/en-in/academic/free-student-products>. [Accessed: 11-Dec-2019].
- [104] L. A. S. Laboratory, “Selected Hugoniot,” *La-4167-MS*, 1969.
- [105] G. R. Johnson and W. H. Cook, “Fracture characteristics of three metals

- subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures,” *Eng. Fract. Mech.*, 1985.
- [106] E. M. Hunt, S. Malcolm, M. L. Pantoya, and F. Davis, “Impact ignition of nano and micron composite energetic materials,” *Int. J. Impact Eng.*, 2009.
- [107] O. F. Luhovskyi, A. I. Zilinskyi, and I. A. Hryshko, “MATH MODEL OF FILTRATION IN AN ULTRASONIC FIELD OF INCREASED INTENSITY,” *J. Mech. Eng. NTUU “Kyiv Polytech. Institute,”* vol. 74, p. 2015, 2015.
- [108] Г. И. Игнациус, *Теория поля*. Москва: Знание, 1971.
- [109] Л. Ф. Лепендин, *Акустика / Учебн. Пособие для вузов*. Москва: Высшая школа, 1978.
- [110] В. И. Смирнов, *Курс высшей математики. Том второй*. Москва: Наука, 1974.
- [111] T. Nakayama and H. Shima, *Higher mathematics for physics and engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [112] С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, и У. Уивер, *Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Л.Г Корнейчука*. Москва: Машиностроение, 1985.
- [113] J. Guggenberger and G. Müller, “Vibrations,” in *Handbook of Engineering Acoustics*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 651–690.
- [114] І. М. Берник, І. А. Гришко, та О. Ф. Луговський, “Методика розрахунку ультразвукового кавітаційного обладнання для технологічного процесу гідролізу-екстракції пектину,” *Вібрації в техніці та технологіях*, № 56, с. 123–128, 2009.
- [115] Д. Кумабэ, *Вибрационное резание*. Москва: Машиностроение, 1985.
- [116] В. А. Богуслаев и др., *Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением. Монография*. Запорожье: Мотор Січ, 2012.
- [117] О. Ф. Луговський, І. А. Гришко, та А. В. Мовчанюк, “Пристрій для кавітаційної обробки рідини,” 2010.
- [118] A. F. Luhovskyi, I. A. Gryshko, A. I. Zilinskiy, and B. V. Patsola, “The Impact of Static Pressure on the Intensity of Ultrasonic Cavitation in Aqueous Media,”

- J. Water Chem. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 285–299, 2018.
- [119] O. Luhovskyi, I. Bernyk, and I. Gryshko, “Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology,” *J. Water Chem. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 95–101, 2018.
- [120] И. Н. Богачев и Р. И. Минц, *Повышение кавитационно–эрозионной стойкости деталей машин*. Москва: Машиностроение, 1964.
- [121] И. Н. Богачев и Р. И. Минц, *Кавитационные разрушения и кавитационностойкие сплавы*. Москва: Машиностроение, 1972.
- [122] М. М. Глазков, В. Г. Ланецкий, Н. Г. Макаренко, и И. П. Челюканов, *Кавитация в жидкостных системах воздушных судов*. Киев: Книга, 1987.
- [123] М. М. Глазков, С. В. Пилипенко, и В. Н. Куринков, “Эрозия алюминиевых сплавов в среде авиационных масел и топ-лив,” *Исследование процессов подготовки, применения и контроля качества авиаГСМ и спецжидкостей*, с. 26–27, 1991.
- [124] W. Backe and W. Kleinbreuer, “Kavitation und kavitations erosion in hydraulischen System,” *Konstrukteur*, vol. 12, no. 4, pp. 32–46, 1981.
- [125] К. Присс, *Эрозия*. Москва: Мир, 1982.
- [126] A. F. Conn, V. E. Johnson, W. T. Lindenmuth, G. L. Chaine, and G. . Frederick, “Some unusual applications for cavitating water jets,” *Proc. 7th Int. Symp. Jet Cut. Techn.*, pp. 1–12, 1984.
- [127] A. Šarc, T. Stepišnik-Perdih, M. Petkovšek, and M. Dular, “The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 34, pp. 51–59, 2017.
- [128] Л. А. Галин, А. П. Фролов, и К. К. Шальнев, “Возникновение кавитации при обтекании выступа на стенке в плоском канале,” *Прикладная механика в технической физике*, № 4, с. 172–175, 1970.
- [129] М. М. Глазков, В. Г. Ланецкий, Н. Г. Макаренко, и Н. П. Челюканов, *Кавитация в жидкостных системах воздушных судов*. Киев: Книга, 1987.
- [130] А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, А. И. Зилинский, и А. Д. Лавриненков, “Повышение производительности ультразвуковых распылителей

- жидкости,” *Mech. Adv. Technol.*, № 80, с. 113–122, 2017.
- [131] О. Ф. Луговський, А. І. Зілінський, І. А. Гришко, та В. В. Жила, “Дослідження впливу ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали,” in *XXIV МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ “ГІДРОАЕРОМЕХАНІКА В ІНЖЕНЕРНІЙ ПРАКТИЦІ,”* 2019, с. 85–87.
- [132] О. В. Березюк, “Планування багатфакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів,” *Вібрації в техніці та технологіях*, № 55, с. 92–97, 2009.
- [133] О. В. Березюк, “Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттевозі на основі комп’ютерної програми ‘PlanExp,’” *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 23–28, 2016.
- [134] Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, и Ю. В. Грановский, *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва: Наука, 1976.
- [135] Н. С. Равская, *Разработка прогрессивных режущих инструментов на основе моделирования их работы методом самоорганизации : диссертация ... доктора технических наук*. Киев, 1998.
- [136] Я. П. Драган, *Структура и представления моделей стохастических сигналов*. Киев: Наукова думка, 1980.
- [137] “Learning algorithms,” 2017. [Online]. Available: https://gmdhsoftware.com/docs/learning_algorithms. [Accessed: 10-Aug-2020].
- [138] Н. С. Равська, П. П. Мельничук, А. Г. Кас’янов, та Р. П. Родін, *Технологія інструментального виробництва*. Житомир: ЖІТІ, 2001.
- [139] “Download GMDH Shell for Data Science,” 2020. [Online]. Available: <https://gmdhsoftware.com/signup-ds>. [Accessed: 10-Aug-2020].
- [140] Е. С. Левшина и П. В. Новицкий, *Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов*. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1983.
- [141] П. В. Новицкий и И. А. Зограф, *Оценка погрешностей результатов*

измерений. Ленинград: Энергоатомиздат, 1985.

- [142] Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Я. И. Израилович, Ю. И. Китайгородский, и А. В. Кутузов, “Способ измельчения материалов,” А.С.170435, 1965.
- [143] В. И. Башкиров, “Эффективный метод управления процессом ультразвуковой кавитации,” *Промышленное применение ультразвука*, с. 3–14, 1965.
- [144] Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, и Ю. И. Китайгородский, “Способ повышения эффективности воздействия ультразвука на процессы протекающие в жидкостях,” *Ультразвуковая техника*, № 3, с. 28–35, 1964.
- [145] Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, и Ю. И. Китайгородский, “Использование избыточного статического давления для управления процессом ультразвуковой кавитации,” *Ультразвуковая техника*, № 1, с. 6–14, 1966.
- [146] Л. Д. Розенберг, Ed., *Физика и техника мощного ультразвука. т. 2*. Москва, 2012.
- [147] T. Leong, M. Ashokkumar, and K. Sandra, “The fundamentals of power ultrasound - A review,” *Acoustics Australia*. 2011.
- [148] М. О. Вакуленко и О. В. Вакуленко, *Тлумачний словник із фізики*. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008.

Додатки



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **132117** (13) **U**
(51) МПК
C02F 1/36 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2018 09320**
(22) Дата подання заявки: **12.09.2018**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **11.02.2019**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **11.02.2019, Бюл.№ 3**

(72) Винахідник(и):
**Луговський Олександр Федорович (UA),
Берник Ірина Миколаївна (UA),
Гришко Ігор Анатолійович (UA),
Зілінський Андрій Іванович (UA),
Луговська Катерина Олександрівна (UA),
Храменков Олександр Васильович (UA)**
(73) Власник(и):
**Луговський Олександр Федорович,
бул. Вацлава Гавела, 31, кв. 24, м. Київ,
03065 (UA),
Берник Ірина Миколаївна,
пр. Юності, 73, кв. 70, м. Вінниця, 21027
(UA),
Гришко Ігор Анатолійович,
пров. Ковальський, 22-а, кв. 306, м. Київ,
03056 (UA),
Зілінський Андрій Іванович,
вул. Клавдіївська, 40-в, кв. 70, м. Київ,
03164 (UA),
Луговська Катерина Олександрівна,
бул. Вацлава Гавела, 31, кв. 31, м. Київ,
03065 (UA),
Храменков Олександр Васильович,
вул. Металістів, 6, кв. 224, м. Київ, 03056
(UA)**

(54) СПОСІБ ПІДГОТОВКИ ВОДИ В БАСЕЙНАХ ДЛЯ ПЛАВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

(57) Реферат:

Спосіб підготовки води в басейнах для плавання із застосуванням ультразвуку, при якому в воду протягом тривалого часу вводять ультразвукові коливання з інтенсивністю, що перевищує поріг виникнення ультразвукової кавітації, за допомогою ультразвукового кавітатора. Застосовують проточний ультразвуковий кавітатор, який встановлюють перед фільтром у зовнішню гідросистему басейна, через яку здійснюють прокачування води з метою фільтрації від механічних забруднень.

UA 132117 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **108589** (13) **C2**

(51) МПК

C02F 1/36 (2006.01)**C02F 1/48** (2006.01)**B01D 33/03** (2006.01)**B01D 39/12** (2006.01)ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

(21) Номер заявки: а 2014 07339

(22) Дата подання заявки: 01.07.2014

(24) Дата, з якої є чинними
права на винахід: 12.05.2015(41) Публікація відомостей
про заявку: 10.02.2015, Бюл.№ 3(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: 12.05.2015, Бюл.№ 9

(72) Винахідник(и):

Луговський Олександр Федорович (UA),
Мовчанюк Андрій Валерійович (UA),
Гришко Ігор Анатолійович (UA),
Зілінський Андрій Іванович (UA),
Луговський Олександр Олександрович
(UA)

(73) Власник(и):

Луговський Олександр Федорович,
бул. Лепсе, 31, кв. 24, м. Київ, 03065 (UA),
Мовчанюк Андрій Валерійович,
вул. Грушевського, 9, кв. 40, м. Вишгород,
Київська обл., 07300 (UA),
Гришко Ігор Анатолійович,
пров. Ковальський, 22-а, кв. 306, м. Київ,
03056 (UA),
Зілінський Андрій Іванович,
вул. Виборзька, 1, кв. 212, м. Київ, 03056
(UA),
Луговський Олександр Олександрович,
бул. Лепсе, 31, кв. 24, м. Київ, 03065 (UA)(56) Перелік документів, взятих до уваги
експертизою:UA 92987 C2, 27.12.2010
UA 55323 A, 17.03.2003
UA 96990 C2, 26.12.2011
WO 2006108600 A1, 19.10.2006
RU 2218976 C1, 20.12.2003
GB 2170732 A, 13.08.1986
SU 154187, 1963
US 6395186 B1, 28.05.2002
RU 2206513 C1, 20.06.2003

UA 108589 C2

(54) УЛЬТРАЗВУКОВЕ КАВІТАЦІЙНЕ ОБЛАДНАННЯ

(57) Реферат:

Ультразвукове кавітаційне обладнання містить резонансну трубчасту кавітаційну камеру, виконану у вигляді цілісної труби, акустично розв'язаної з місцями кріплення та під'єднання. На зовнішній твірній поверхні труби вздовж твірних ліній посекційно встановлені складені ультразвукові перетворювачі з ножеподібними трансформаторами коливальної швидкості, які електрично підключені до генератора електричних коливань. Місце розміщення ультразвукових перетворювачів в межах секцій та відстань між секціями вздовж труби регламентовані параметрами резонансних коливань труби. Для можливості фільтрування рідини трубчаста кавітаційна камера розміщена вертикально, в нижній частині з'єднана з конусоподібним шламозбірником, який має патрубок для відведення фільтрату, крім того, може містити клапан

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Б.о. голови правління

ПРАТ "Цикорій"

Бистрицький Петро Олексійович

«15» січня 2019р



АКТ

впровадження результатів науково-дослідної роботи

Науковцями Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» виконана науково-дослідна робота «Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких середовищ». Роботу виконував асистент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки Зілінський А.І. під науковим керівництвом д.т.н., професора Луговського О.Ф.

Авторами була запропонована та досліджена технологія фільтрування рідини в кавітаційному середовищі, що дозволило покращити тонкість фільтрації в 2,5 рази при збільшенні продуктивності в 2 рази. Застосована ультразвукова кавітація в об'ємі фільтра дозволила реалізувати ефект самоочищення фільтрувального елементу. Автори дослідили стійкість різних матеріалів до руйнівної дії ультразвукової кавітації, що дозволило забезпечити тривалий термін працездатності фільтра. Важливою особливістю застосування вказаної технології є додатковий ефект знезараження рідини за рахунок впливу на шкідливі мікроорганізми в рідині ефектів, що супроводжують явище ультразвукової кавітації. Інтелектуальна власність виконаної розробки захищена.

Авторами надані рекомендації щодо ефективного застосування вказаної наукової розробки в технологічному процесі виготовлення згущеного цикорію на нашому підприємстві. Використання даного фільтра дозволило збільшити час використання фільтроелементу на 50%.

Даний Акт не є підставою для проведення взаємних фінансових розрахунків.

Від КПІ ім. Ігоря Сікорського:
науковий керівник,
д.т.н., проф. Луговський О.Ф.



асистент Зілінський А.І.



Від ПрАТ "Цикорій":
Бистрицький Петро Олексійович





АКТ
впровадження результатів науково-дослідної роботи

Колективом науковців Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під науковим керівництвом д.т.н., проф. Луговського О.Ф. і при безпосередній участі аспіранта Зілінського Андрія Івановича, докторанта Мовчанюка Андрія Валерійовича та докторанта Берник Ірини Миколаївни розроблено та виготовлено ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом регенерації. Ультразвукове технологічне обладнання розроблено та досліджено з метою підвищення ступеню очищення сонячної олії та забезпечення постійної регенерації фільтрувального елемента за рахунок ефектів, що супроводжують явище ультразвукової кавітації. Науковцями розроблена методика розрахунку інноваційного технологічного обладнання, проведено комп'ютерне моделювання процесу фільтрування та процесу руйнування фільтроелемента в кавітаційному середовищі, експериментально досліджена кавітаційна стійкість застосованих конструкційних матеріалів для забезпечення тривалого функціонування обладнання в умовах ультразвукової кавітації.

Створений науковцями експериментальний зразок інноваційного фільтрувального обладнання встановлено та випробувано в технологічній лінії по виробництву сонячної олії. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність запропонованого авторами обладнання.

Впровадження ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання дозволило покращити конкурентоздатність продукції підприємства. Термін беззмінної роботи фільтрувального елемента вдалося підвищити на 41%.

Даний Акт не є підставою для проведення фінансових взаєморозрахунків.

Від КПІ ім. Ігоря Сікорського
науковий керівник, д.т.н., проф.
_____ О.Ф. Луговський
асистент

_____ А.І. Зілінський
к.т.н., доцент

_____ А.В. Мовчанюк
к.т.н., доцент

_____ І.М. Берник



«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Перший проректор КПІ ім. Ігоря
Сікорського академік НАНУ
/Юрій ЯКИМЕНКО/
«10» вересня 2020 р.

про використання матеріалів дисертаційної роботи Зілінського А.І., що виконана на кафедрі «Прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Даним актом підтверджується, що отримані Зілінським А.І. результати дисертаційної роботи «Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких середовищ» використані в навчальному процесі підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 131 – прикладна механіка при викладанні наступних дисциплін:

- в курсі «Основи гідроавтоматики» використаний розділ, що стосується теоретичного та експериментального дослідження ультразвукової кавітації;
- в курсі «Гідроавтоматика і керування» застосовані математичні моделі розповсюдження ультразвукових коливань в обмежених об'ємах ультразвукових кавітаційних камер;
- в курсі «Основи електрогідроавтоматики мехатронних систем» використані розділи, що стосуються принципів побудови високоефективних ультразвукових кавітаційних пристроїв для очищення рідин.

Використання зазначених засобів дозволило розширити тематику навчального матеріалу зазначених курсів та створило умови для практичного засвоєння сучасних досягнень в напрямку конструкцій сучасних пристроїв, що використовують ефект ультразвукової кавітації.

Директор ММІ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
д.т.н., проф.

/секретар Вченої Ради
КПІ ім. Ігоря Сікорського
к.т.н., доц.

М.І. Бобир

В.П. Приходько